

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Narzędzie weryfikacji zaawansowanych algorytmów sterowania ruchem drogowym

MARCIN STANIEK

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, WYDZIAŁ TRANSPORTU

STRESZCZENIE

W pracy przedstawiono wytyczne obliczenia przepustowości z ukierunkowaniem na metodę obliczeń realizowaną w warunkach polskich. Omówiono narzędzia symulacyjne obecnie stosowane do analizy stanu ruchu drogowego. Przedstawiono środowisko symulacyjne VISSIM ze szczegółowym opisem modułu sterowania, w tym interface dla sterownika zewnętrznego.

Opracowano model opisu faz ruchu bazujący na standardzie opisu danych pua programu Crossig. Zbudowano sterownik dla sterowania fazowego z obsługą zmiany faz ruchu przy zachowaniu wymagań bezpieczeństwa w tym czasów międzyzielonych.

Przedstawiono przykład algorytmu sterowania ruchem na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną oraz procedurę jego weryfikacji.

The verification tool for advanced traffic control algorithms

ABSTRACT

The guidelines of calculating road traffic capacity in Polish conditions were presented at the work. At present applied simulation tools for analysis the road traffic were discussed. Simulation environment VISSIM was presented with the detailed description of control module, including the interface for the external controller.

The model for description of traffic phases based on a standard description of pua data was presented. The controller was implemented for the stage control with the interstage procedure with respect to formal requirements and traffic safety.

An example presents the algorithm of the traffic control on an intersection and a procedure of his verification.

1. WPROWADZENIE

W literaturze można napotkać szereg pozycji, w których prezentowane są różnorodne metody sterowania ruchem drogowym [1-11]. Niektóre z tych metod zostały wdrożone i są obecnie eksploatowane w wielu miastach, np.: CRONOS [1], SCOOT [2], UTOPIA [3], RHODES [4].

Inne spośród tych metod mają charakter eksperymentalny, były testowane jedynie w warunkach symulacyjnych lub na wybranych skrzyżowaniach. Najnowsze rozwiązania dotyczą zastosowania metod sztucznej inteligencji do sterowania ruchem drogowym [5], w szczególności systemów wieloagentowych [6], systemów immunologicznych [7], logiki rozmytej [8], sieci neuronowych [9], algorytmów genetycznych [10] oraz automatów komórkowych [11].

W tym obszarze badań wiele miejsca poświęcono samym algorytmom sterowania, natomiast brak jest prac dotyczących symulacji i weryfikacji proponowanych rozwiązań.

Ogólna procedura weryfikacji algorytmów sterowania ruchem drogowym zawiera metody obliczania przepustowości i oceny warunków ruchu pojazdów na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Do obliczania przepustowości na pasach lub obliczeniowych grupach pasów ruchu i wlotach skrzyżowań stosowanych jest wiele metod. Większość z nich bazuje na natężeniu nasycenia oraz opracowanych wynikach badań symulacyjnych. Metody o których mowa to amerykańska HCM uaktualnienie w 2000 [12], metoda brytyjska TRL [13], niemiecka HSB [14], australijska SIDRA [15], kanadyjska [16], szwedzka [17]. W metodach tych występuje wiele elementów wspólnych, a wyniki charakteryzują się dużą zgodnością.

W Polsce w pierwotnej wersji wykorzystano z opracowanej metody obliczania przepustowości z 1992 roku. Aktualna wersja metody polskiej uwzględnia dane empiryczne w skali kraju, wyniki badań symulacyjnych, oraz aktualizacje zgodną ze zmianami wprowadzanymi w metodach zagranicznych. Obejmuje nowe uwarunkowania wynikające z rozporządzenia ministra infrastruktury w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków drogowych i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach [18]. Dotyczy skrzyżowań z programem sygnalizacji stałoczasowym, akomodacyjnym i acyklicznym. Przy sterowaniu akomodacyjnym i acyklicznym jest wykorzystywana do sprawdzania przepustowości dla programu maksymalnie

go realizowanego w okresach występowania ruchu szczytowego oraz chwilowych przeciążeń skrzyżowań [19].

Metodologia analiz nie obejmuje przypadków szacowania wpływu zatłoczeń na wylocie skrzyżowania na jego funkcjonowanie, a także powierzchni akumulacyjnych na skrzyżowaniach z wyspą centralną oraz szerokim pasem dzielącym. Procedura obliczeniowa nie uwzględnia także nietypowych przypadków (np. przejazd kolejowy). W takich przypadkach preferowane jest wykorzystanie do oceny sterowania modeli symulacyjnych.

Generalnie programy symulacji ruchu drogowego można podzielić na trzy kategorie: mikroskopowe, mezoskopowe i makroskopowe. Istnieją także programy symulacyjne bazujące na korelacji dwóch z trzech wspomnianych modeli w celu wyeliminowania wad indywidualnych modeli.

Mikroskopowym model, ciągły lub dyskretny, przewiduje stan pojedynczych pojazdów przy opisie prędkości ruchu pojazdu i jego położenia. W opisie modelu makroskopowym przewidywana jest intensywność ruchu (prędkość strumienia) i miara jej skuteczności – gęstość [20].

Model mezoskopowy stanowi połączenie między podejściem makroskopowym modeli i indywidualnych interakcji mikroskopowych. Dzięki jego wykorzystaniu możliwy jest opis ruchu w wysokim poziomie szczegółu, kiedy jego zachowanie i interakcje zostały zaprojektowane w niższym poziomie szczegółowości [21].

Przykładem symulatora łączącego trzy wcześniej wymienione modele jest środowisko AIMSUN. Dla rozległych sieci drogowych umożliwia opis parametrów dynamicznych sieci co znacząco zmniejsza proces kalibracji w porównaniu z budową rozległej sieci drogowej w mikrosymulatorze [22].

Mikroskopowy symulator ruchu zawarto w oprogramowaniu SimTraffic, który bazuje na modelu sieci drogowej SYNCHRO. Z jego wykorzystaniem można symulować stan ruchu w rozległych arteriach, na izolowanych skrzyżowaniach, autostradach, zbadać wpływ działania ruchu tranzytowego lub pieszych [23].

ACTSIM jest dynamicznym modelem mikrosymulacji, który symuluje każdy pojazd indywidualnie. Jego opis zawiera m.in. bieżącą prędkość pojazdu, prędkość pożądaną, klasę pojazdu, miejsca celu. Środowisko ACTSIM zawiera model kierowcy, model zmiany pasa ruchu, model parkowania, model przejścia dla pieszych i model klasy pojazdu [24].

Mikroskopowy model ruchu wbudowano w program CORSIM przeznaczony do analizy stanu obciążenia

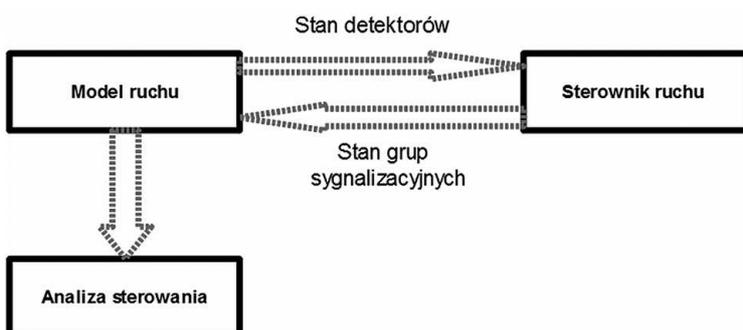
żeń autostrad, ulic miejskich, skrzyżowań oraz fragmentów sieci drogowej. Połączenie modelu ruchu w mieście (TRAF-NETSIM) z modelem autostradowym (FRESIM) czyni z CORSIM kompletne narzędzie do analizy i symulacji ruchu drogowego [25].

Kolejnym programem symulacyjnym jest VISSIM, przeznaczony do modelowania ruchu indywidualnego i komunikacji zbiorowej. Program umożliwia analizę warunków ruchu z uwzględnieniem uwarunkowań takich, jak konfiguracja pasów ruchu, struktura rodzajowa ruchu, sygnalizacja świetlna, przystanki komunikacji zbiorowej. Stanowi użyteczne narzędzie do oceny różnych rozwiązań alternatywnych przy wykorzystaniu miar efektywności sterowania ruchem drogowym [26].

VISSIM jest stosowany przy opracowaniu, ocenie i weryfikacji logiki sterowania dla optymalizacji przepływu ruchu w sieci, analiz zakłóceń ruchu powodowanych m.in. niskimi prędkościami i obszarami przeplatania ruchu. Zaletą programu jest łatwe porównanie alternatywnych projektów obejmujących skrzyżowania ze sygnalizacją, skrzyżowania ze znakami podporządkowania, ronda i wielkie węzły wielopoziomowe [26].

2. NARZĘDZIE SYMULACYJNE VISSIM

Narzędzie symulacyjne VISSIM zbudowano w oparciu o dwa programy: generator stanów sygnalizacji oraz symulator ruchu. Generator stanów sygnalizacji (sterownik ruchu) jest oprogramowaniem sterującym sygnalizacją świetlną, zbierającym informację z detektorów, z symulatora ruchu (model ruchu), na bazie dyskretnych kroków czasowych (rzędu jednej dziesiątej sekundy). Następnie określa on aktualny stan sygnalizacji dla następnej sekundy symulacji i przekazuje tę informację z powrotem do symulatora ruchu. Symulator ruchu generuje w czasie rzeczywistym animację działania ruchu i offline zbiory wynikowe zawierające dane statystyczne, takie jak m.in.: czas jazdy czy długości kolejek. (Rys. 1).



Rysunek 1. Struktura narzędzia symulacyjnego VISSIM

Symulator ruchu w VISSIM jest mikroskopowym modelem strumienia ruchu zawierającym logikę „jazdy za przewodnikiem” (car following) i logikę zmiany pasa ruchu. Istotną cechą dla dokładności modelu symulacyjnego ruchu jest jakość opisu bieżącego zachowania pojazdów; tj. metodologia poruszania się pojazdów w sieci. W przeciwieństwie do mniej złożonych modeli stosujących stałą prędkość i deterministyczną logikę podążania pojazdu za liderem, VISSIM wykorzystuje psychofizyczny model zachowania kierowcy opracowany przez WIEDEMAN-N’a (1974) [27].

Podstawowym założeniem tego modelu jest, że kierowca szybciej poruszającego się pojazdu zaczyna hamować, gdy osiągnie swój indywidualny próg percepcji pojazdu poruszającego się wolniej. Ponieważ nie może on dokładnie określić prędkości pojazdu wolniejszego (poprzedzającego), więc hamuje tak długo aż jego prędkość spadnie poniżej prędkości pojazdu poprzedzającego. W kolejnej fazie lekko przyspiesza do osiągnięcia kolejnego progu percepcji. Prowadzi to do iteracyjnego procesu przyspieszania i hamowania.

Rozkłady stochastyczne progów prędkości i progów przestrzennych odwzorowują charakterystyki indywidualnych zachowań kierowcy. Model ruchu jest kalibrowany drogą wielokrotnych pomiarów terenowych na Uniwersytecie Technicznym w Karlsruhe [26]. Okresowe pomiary i w ich wyniku uaktualnienie parametrów modelu gwarantują uwzględnianie zmian w zachowaniu kierowców i konstrukcji pojazdów.

W programie VISSIM wbudowano moduł sterowania ruchem na projektowanych skrzyżowaniach w oparciu o program cykliczny stałoczasowy (Fixed-Time). Dodatkowo dostępny jest moduł opcjonalny do sterowania akomodacyjnego sygnalizacją świetlną Vehicle-Actuated Signal Control – moduł VAP.

Dla programu VISSIM dostępne są m.in.: interfejsy dla standardów północnoamerykańskich NEMA, Ring Barrier Controller, Econolite ASC/3. Interfejs

do sterowania SCATS opracowanego przez Australian Road Transit Authority New South Wales. Interfejs SCOOT opracowany przez UK’s Transport Research Laboratory oraz inne takie jak: VSPLUS, TRENDS, LISA+OMTC, Type 2070 VS-PLUS [26].

Program dodatkowo umożliwia również zdefiniowanie własnego zaawansowanego algorytmu sterowania, opcja: sterownik zewnętrzny.

2.1. Moduły sterowania ruchem

Sterownik sygnalizacji świetlnej typu "FixedTime" lub „VAS” jest symulowany bezpośrednio w programie VISSIM. Pozostałe są oddzielnymi zewnętrznymi aplikacjami. Dla programów w standardzie opisu DDE plik exe (program logiki sterowania) jest wielokrotnie uruchamiany poprzez symulator VISSIM. Algorytm sterowania zapisany w standardzie bibliotek dll zapewnia pojedyncze otwarcie programu logiki sterowania i komunikacje symulatora ruchu pojazdów ze sterownikiem ruchu.

Częstotliwość sterowania (zwykle 1/s) definiuje liczbę uruchomień algorytmu sterowania na sekundę symulacji i jest określana podczas etapu inicjacji. Jej wielokrotnością jest częstotliwość symulacji modelu ruchu w VISSIM. Brak zgodności częstotliwości sterowania z częstotliwością symulacji generuje błąd wykonania programu.

Na przykład, jeżeli częstotliwość symulacji jest równa 10 kroków symulacji na sekundę a częstość sterownika jest równa 2, to VISSIM symuluje 5 taktów symulacji między dwoma przejściami przez logikę sterowania.

W każdym kroku symulacji na końcu aktualnego kroku symulator VISSIM komunikuje się z aplikacją sterującą sygnalizacją świetlną. W pierwszym etapie przekazuje do sterownika informacje o stanach grup sygnalizacyjnych i dane z detektorów ruchu. W drugim odpytuje sterownik o stany grup sygnalizacyjnych, stany zaktualizowane po przejściu przez logikę sterowania. Zaktualizowane stany grup sygnalizacyjnych są przedstawiane w modelu w nowym kroku symulacji.

Kod źródłowy komunikacji sterownika ruchu z VISSIMEM został zdefiniowany przez PTV_Vision w postaci pliku wzorca „sc_dll_main” zapisanego w środowisku C++. Modyfikacja tego pliku pozwala na opracowanie rozwiązania zewnętrznego sterowania dostosowanego do opracowanej logiki sterowania sygnalizacją świetlną. W nowym pliku wzorca wymagane funkcje sterowania zostaną wywołane z symulatora. W budowie logiki sterowania są wykorzystywane funkcje z pliku sc_dll_functions.

2.2. Interface dla sterowania zewnętrznego

W środowisku VISSIM przed uruchomieniem symulacji ruchu wykonywana jest procedura inicjalizacji. Realizowana jest dla zdefiniowanego sterownika zewnętrznego przypisanego do sieci drogowej i przebiega w dwóch krokach.

W pierwszym kroku VISSIM wywołuje funkcję SC_DLL_ReadDataFiles(). Argumenty tej funkcji to dwa

zbiory parametrów wejściowych wykorzystywane w algorytmie sterowania ruchem. Odczytane z plików zewnętrznych dane wymagają zgodności z zapisem w standardzie wtt [26].

Krok drugi, VISSIM wywołuje funkcję SC_DLL_Init(). Funkcja inicjuje parametry wejściowe algorytmu sterowania m.in.: długości minimalnych i maksymalnych czasów trwania sygnałów świetlnych, długości czasów międzyzielonych, przydział fazy ruchu. Dodatkowo jeżeli częstotliwość sterownika jest inna niż wartość domyślna (1/s), wywołana zostaje funkcja SC_SetFrequency().

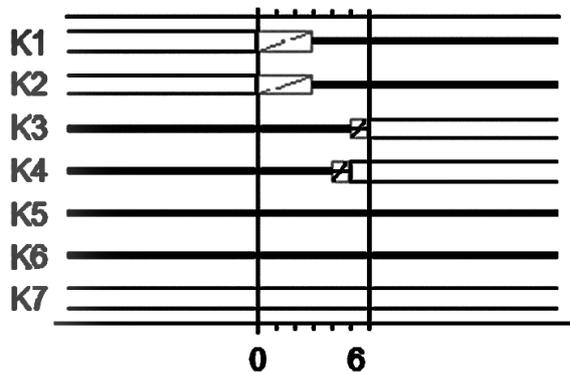
Po procedurze inicjującej rozruch uruchamiana jest symulacja ruchu. Dla każdego kroku symulacji oraz każdego zdefiniowanego sterownika ruchu drogowego jest wywoływana funkcja SC_DLL_Calculate(). Funkcja zawiera algorytm sterowania ruchem. Z tego poziomu możliwy jest odczyt danych z detektorów i stan grup sygnalizacyjnych przez funkcje zawarte w „sc_dll_functions”. Wartości zwracane przez funkcje są przekazywane automatycznie do VISSIM przed końcem procedury SC_DLL_Calculate().

Na końcu symulacji VISSIM wywołuje funkcję zwalniania pamięci SC_DLL_Clean(). Dodatkowo zapis pełnego stanu parametrów symulacji określonego sterownika możliwy jest po wywołaniu funkcji SC_DLL_WriteSnapshotFile(). Wywołanie odczytu funkcją SC_DLL_ReadDataFiles() dezaktywuje procedurę inicjującą i odczyt stanu wcześniej zapisanych parametrów sterownika.

3. MODEL STEROWANIA RUCHEM WG PRZEJŚĆ MIĘDZYFAZOWYCH

Przejście międzyfazowe to część programu sygnalizacji świetlnej w której przeprowadzana jest zmiana faz ruchu. Bezpieczny sposób zmiany z jednej fazy ruchu na inną. W przejściu międzyfazowym występuje zmiana sygnału świetlnego nadawanym grupom sygnalizacyjnym z sygnału zezwalającego na sygnał zabraniający wjazd na skrzyżowanie i odwrotnie. Dla części grup sygnalizacyjnych może nie występować zmiana sygnału świetlnego. Opracowane przez projektanta przejście międzyfazowe może zostać wykonywane dla całego lub części skrzyżowania.

Przykład przejścia międzyfazowych przedstawia Rysunek 2. Grupy sygnalizacyjne K1, K2 otrzymują sygnał światła czerwonego, dla grupy K3, K4 rozpoczyna się nadawanie sygnału światła zielonego. Dla grupy K5, K6, K7 nie występuje punkt przełączeń tym samym nie następuje zmiana nadawanego sygnału.



Rysunek 2. Graficzna ilustracja przejścia międzyfazowego

Podstawowym parametrem opisu przejścia międzyfazowego jest przedział czasu jego trwania zdefiniowany przez najdłuższy czas międzyzielony dla dwóch wzajemnie kolizyjnych grup sygnalizacyjnych występujących w danej zmianie faz ruchu. Ponadto zdefiniowane czasy końca nadawania sygnału światła zielonego oraz czerwonego. Dodatkowo czasy trwania sygnałów światła żółtego i czerwonego z żółtym zgodnie z wymaganiami formalnymi rozporządzenia ministra infrastruktury [18]. Grupy sygnalizacyjne które podczas przejścia międzyfazowego nie zmieniają nadawanego światła nie są uwzględniane w jego opisie.

Implementacja realizacji przejścia międzyfazowego przebiega w następujących etapach:

1. Sprawdzenie czy nie jest realizowane inne przejście międzyfazowe,
2. Sprawdzenie czy minął wymagany czas otwarcia fazy ruchu (min 5 sekund),
3. Realizacja zmiana fazy ruchu dla grup sygnalizacyjnych zmieniających wyświetlany sygnał.

Grupy sygnalizacyjne są przełączane zgodnie z czasem końca sygnału światła zielonego, oraz czasem końca sygnału światła czerwonego licząc od czasu uruchomienia przejścia międzyfazowego. Na Rysunku 1 grupa K1 po 4 sekundach od uruchomienia międzyfazy zmiana wyświetlany sygnał na żółty.

Zgodnie z wymaganiami formalnym rozporządzenia [18] w sygnalizacji acyklicznej wszystkie strumienie ruchu powinny otrzymać sygnał zielony stosownie do zapotrzebowania jednak nie mniej niż 5 sekund. Tym samym kolejne uruchomienie międzyfazy może nastąpić po upływie tego czasu.

Zestawienie przejść międzyfazowych z zachowaniem minimalnego czasu trwania światła zielonego tworzy program sterowania sygnalizacją świetlną. Konstrukcja programu sygnalizacji wymaga uzyskania sygnału światła zielonego w przedziale czasu nieprzekraczającym 120 sekund dla grup sygnalizacyjnych oczekujących zezwolenia na ruch w programie acyklicznym.

Idea budowy programu sygnalizacji świetlnej oparta na przejściach międzyfazowych spełnia wymagania formalne i wymagania bezpieczeństwa ruchu zgodnie z rozporządzenia ministra infrastruktury [18]. Pozwala na proste tworzenie programu sygnalizacji świetlnej bez konieczności weryfikacji wymagań bezpieczeństwa ruchu na skrzyżowaniu.

Opracowany model przejść międzyfazowych pozwala dostosowywać program sygnalizacji świetlnej do warunków ruchu na skrzyżowaniu. W zależności od stanu zgłoszeń z systemu detekcji możliwe jest przełączanie faz ruchu oraz określanie czasu ich wykonywania.

Zaproponowany przez projektanta algorytm sterowania ruchem oraz zaproponowany w pracy model przejść międzyfazowych określa program sterowania sygnalizacją świetlną. Konstrukcja programu przy wykorzystaniu środowiska symulacyjnego VIS-SIM umożliwia proces optymalizacji programów sygnalizacyjnych do zmiennych warunków ruchu dla uzyskania możliwie największej efektywności sterowania ruchem drogowym.

4. ZAAWANSOWANE ALGORYTMY STEROWANIA RUCHEM DROGOWYM

Podstawową funkcją sterownika sygnalizacji świetlnej ruchu drogowego jest wpływ na zachowanie kierujących pojazdami, pieszych poprzez zmianę sygnałów świetlnych wg zbioru zasad opisanych algorytmem sterowania. Klasyczna teoria sterowania wykorzystuje model matematyczny do określania zależności opisu stanu systemu i sygnałów sterowania dla tego systemu.

Przy podejściu klasycznym wraz ze wzrostem złożoności systemu rozbudowuje się jego opis matematyczny. Sterowanie rozmyte zamienia model matematyczny na zbiór prostych reguł. Pojedyncze reguły opisują elementy systemu, a ich wzajemne powiązanie w proces wnioskowania określa żądany sygnał wyjścia.

Idea sterowania rozmytego sygnalizacją świetlną określa algorytm sterowania ruchem jako algorytm opisany na bazie wiedzy, zakodowanej w postaci reguł. Baza wiedzy jest zbudowana na podstawie ludzkiego doświadczenia i intuicji oraz na podstawie teoretycznego i praktycznego zrozumienia dynamiki obiektu sterowanego. Wymaga specjalistycznej wiedzy i doświadczenia w sterowaniu ruchem drogowym.

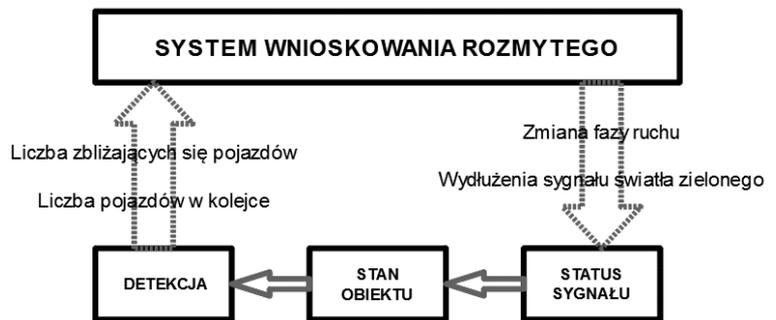
Zaletą sterowania rozmytego jest możliwość wykorzystania nieściślych i lingwistycznych danych jako użytecznych w projektowaniu programu pracy sygnalizacji świetlnej.

4.1. Sterownik rozmyty dla sygnalizacji świetlnej

Cykliczny program sterowania sygnalizacją świetlną to często spotykane rozwiązanie sterowania strumieniami ruchu na skrzyżowaniach. Fazy ruchu są aktywowane przez pojazdy przejeżdżające przez odpowiednie detektory zapewniając ich uczestnikom wymagany minimalny czas nadawania sygnału światła zielonego. Jeżeli natężenie ruchu pojazdów jest na odpowiednim poziomie, to długość czasu nadawania sygnału światła zielonego zostaje przedłużona proporcjonalnie do liczby pojazdów jednak nie dłużej niż do wartości maksymalnej.

Aktywna grupa sygnalizacyjna w fazie ruchu w przypadku braku zgłoszeń od innych uczestników ruchu utrzymuje sygnał światła zielonego (zielony pasywny). W momencie zgłoszenia sygnał zostaje przełączony. W przypadku braku zgłoszeń zapotrzebowania na ruch od wszystkich grup sygnalizacyjnych sterownik wy-

Odpowiedzią systemu wnioskowania rozmytego jest zmienna wyjściowa W określająca wydłużenie sygnału światła zielonego. Wydłużenie na poziomie zerowym oznacza zmianę fazy ruchu w programie sterowania sygnalizacją świetlną.



Rysunek 3. System rozmytego sterowania dwufazową sygnalizacją

System rozmytego sterowania sygnalizacją świetlną przedstawiono na Rysunku 3.

Jeżeli $Z = \text{zero}$	to	Zmiana fazy ruchu (zainicjowanie przejścia międzyfazowego)
Jeżeli Z jest mała	i	K jest mała to W jest krótkie lub
Jeżeli Z jest średnia	i	K jest dowolna to W jest średnie lub
Jeżeli Z jest duża	i	K jest dowolna to W jest długie

świetła sygnał światła czerwonego dla całego skrzyżowania.

Zaproponowany w pracy algorytm rozmyty sterowania sygnalizacją świetlną wykorzystuje dane z systemu detekcji ruchu pojazdów. Detektory w modelu skrzyżowania zdefiniowano na każdym z wlotów na skrzyżowanie przy linii warunkowego zatrzymania (detektor obecności) oraz 100m od niej (detektor przejazdu). Ten sposób lokalizacji detektorów pozwala określić liczbę pojazdów zbliżających się do linii warunkowego zatrzymania w przedziale czasu kolejnych 6-8 sekund oraz liczbę pojazdów w kolejce przed linią zatrzymania.

Opracowany w pracy algorytm rozmyty sterowania sygnalizacją świetlną ma za zadanie inicjować zmianę faz ruchu (aktywować przejście międzyfazowe) oraz wydłużać czas trwania sygnału światła zielonego. Wybór jest dokonywany na podstawie danych z systemu detekcji w połączeniu z informacją wnioskowania rozmytego.

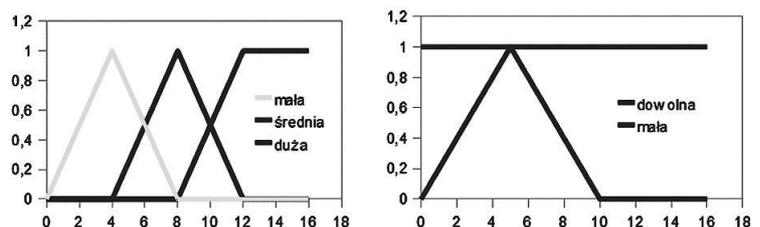
W opracowanym algorytmie sterowania rozmytego zdefiniowano dwie zmienne wejściowe w bazie reguł rozmytych:

- Z – liczbę pojazdów zbliżających się do skrzyżowania,
- K – liczbę pojazdów w kolejce.

Reguły rozmyte inicjowania przejścia międzyfazowego i wydłużania czasu trwania sygnału światła zielonego przedstawiono poniżej.

Zgodnie z wymaganiami formalnymi programów sygnalizacji system wnioskowania rozpoczyna pracę po nadaniu minimalnej długości sygnału światła zielonego.

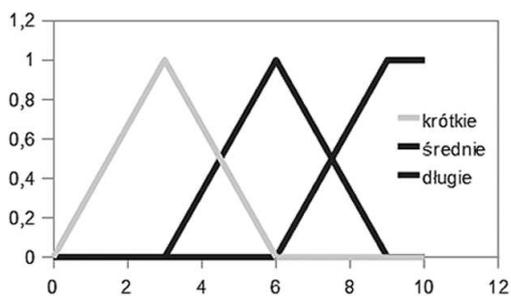
Funkcje przynależności liczby pojazdów zbliżających się do skrzyżowania i liczby pojazdów oczekujących



Rysunek 4. Funkcja przynależności liczby pojazdów zbliżających się do skrzyżowania oraz funkcja przynależności liczby pojazdów oczekujących w kolejce

w kolejce przedstawiono odpowiednio na Rysunku 4a i 4b.

Odpowiedź systemu wnioskowania rozmytego to zmiana fazy ruchu lub wydłużenie sygnału światła zielonego. Otrzymana informacja o świetle zielonym wymaga przekształcenia wartości rozmytych na wartości dyskretne. W pracy proces defuzyfikacji oparto o metodę Centroid.



Rysunek 5. Funkcja przynależności wydłużenia sygnału światła zielonego

Wydłużenie sygnału światła zielonego określono funkcją przynależności przedstawioną na Rysunku 5.

5. WERYFIKACJA ALGORYTMÓW STEROWANIA RUCHEM DROGOWYM

W środowisku symulacyjnym VISSIM do weryfikacji projektowanych rozwiązań drogowych w tym algorytmów sterowania wykorzystywane są miary oceny warunków ruchu. Możliwe jest wyznaczenie parametrów istotnych dla optymalizacji programu sterowania takich jak: czas przejazdu, czas opóźnień, liczba pojazdów znajdujących się w kolejce. Podstawową miarą oceny warunków ruchu na modelowanym rozwiązaniu jest czas przejazdu określane jako łączny średni czas przejazdu przez odcinek pomiarowy. Czas uwzględnia zatrzymania się pojazdów wynikające z ograniczeń ruchu na modelowanym skrzyżowaniu drogowym.

Czas opóźnień to średnia łączna strata czasu przypadająca na pojazd. Całkowite opóźnienie jest obliczone dla każdego pojazdu, który zakończył przejazd odcinka pomiarowego, przez odjęcie teoretycznego czasu przejazdu od czasu rzeczywistego. Teoretyczny czas przejazdu jest czasem, który zostałby osiągnięty jeśli na odcinku pomiarowym nie było innych pojazdów oraz ograniczeń ruchu wynikających ze sterowania ruchem lub innych zatrzymań w sieci. W obliczeniach czasu teoretycznego przejazdu odcinka pomiarowego uwzględniane są obszary ograniczonej prędkości.

Dodatkowo miara opóźnienia umożliwia wyznaczyć średni czas pełnego zatrzymania na pojazd oraz liczbę zatrzymań na pojazd. Miary tutaj omawiane nie obejmują pojazdów wykonujących manewry na parkingach.

W przypadku miar kolejki pojazdów możliwe jest wyznaczenie jej średniej oraz maksymalnej długości, a także liczby zatrzymań pojazdów w kolejce. Oprogramowanie pozwala na określenie parametrów definiujących warunki ruchu jako kolejkę pojazdów. Do parametrów tych zaliczamy prędkość początku i

końca udziału pojazdu w kolejce oraz maksymalną odległość między pojazdami.

Miary wymagają zdefiniowania odcinków pomiarowych w postaci określenia przekrojów dróg dla początku i końca odcinka pomiarowego. W przypadku kolejki pojazdów określa się przekrój drogi, od którego rozpocznie się w procesie symulacji tworzenie kolejek. Domyślnie są to linie zatrzymań w obszarze skrzyżowania.

Przedstawione miary oceny warunków ruchu dla zaproponowanego rozwiązania mogą być wyznaczane dla zadanych przedziałów czasu. Pozwala to na precyzyjny opis sytuacji ruchowej na skrzyżowaniu w przypadku długich okresów symulacyjnych, gdzie znacząco zmieniają się natężenia ruchu.

Ze względu na rozbudowany zbiór danych opisujących warunki ruchu na modelowanym skrzyżowaniu w dalszej części pracy przedstawiono ogólne miary oceny warunków ruchu. Szczegółowe wyniki badań oceny algorytmu sterowania pominięto.

Parametry ogólne oceny warunków ruchu modelowanego rozwiązania sterowania rozmytego sygnalizacją świetlną dla okresu pomiarowego 1h przed-

Parametry oceny warunków ruchu	Wartość
łączny czas przejazdu [h]	21,96
łączny czas zatrzymań [h]	6,62
Liczba zatrzymań	1081
łączne opóźnienie [h]	9,46
Średnie opóźnienie na pojazd [s]	21,11
Średni czas zatrzymania na pojazd [s]	14,78
Średnia liczba zatrzymań na pojazd	0,67

stawia Tabela 1.

W przypadku konieczności szczegółowej oceny warunków ruchu i braku wybranej miary jej oceny na modelowanym skrzyżowaniu możliwy jest zapis parametrów ruchu poszczególnych pojazdów w sieci. Zagregowanie i analiza takich danych pozwala wyznaczyć szczegółowy opis sytuacji ruchowej na skrzyżowaniu, ocenę algorytmu sterowania i jego weryfikację wg wymagań projektanta.

6. WNIOSKI

Celem pracy było opracowanie narzędzia do weryfikacji zaawansowanych algorytmów sterowania ruchem drogowym na skrzyżowaniach izolowanych.

Wykorzystano do tego narzędzie symulacyjne VISSIM obecnie stosowane do analizy stanu ruchu drogowego. Opracowano i zaimplementowano w języku Visual C++ zewnętrzny sterownik dla sterowania fazowego przy zachowaniu wymagań formalnych i wymagań bezpieczeństwa rozporządzenia ministra infrastruktury [18].

Zaproponowany przez autora model przejść międzyfazowych umożliwi bezpieczny sposób zmiany z jednej fazy ruchu na inną. Zapewnia jednocześnie prosty sposób budowy programu pracy sygnalizacji świetlnej. Umożliwia to modelowanie i implementację zaawansowanych algorytmów sterowania ruchem bazujących na sztucznej inteligencji [5], systemach wieloagentowych [6], systemach immunologicznych [7], logice rozmytej [8], sieciach neuronowych [9], algorytmach genetycznych [10] oraz automatach komórkowych [11].

Sterowanie rozmyte zaproponowane jako przykład zaawansowanego algorytmu sterowania wykorzy-

stuje informacje z systemu detekcji ruchu pojazdów i pieszych. Ten rodzaj sterowania nie wymaga wysokiej częstotliwości podejmowania decyzji dotyczącej zmiany nadawanych sygnałów świetlnych w przeciwieństwie do klasycznego sterowania acyklicznego. Informacja o wydłużeniu sygnału zielonego stanowi przedział czasu, w którym sterownik ruchu nie podejmuje kolejnej decyzji.

Zaproponowane rozwiązanie sterowania rozmytego sygnalizacją świetlną wymagało optymalizacji dla zmiennych warunków ruchu na skrzyżowaniu. Dokonano modyfikacji funkcji przynależności dojazdu pojazdów do skrzyżowania i funkcji przynależności pojazdów zatrzymanych w kolejce dla uzyskania najlepszych wyników oceny efektywności sterowania.

Zastosowanie do symulacji ruchu drogowego środowiska VISSIM umożliwiło opracowanie, ocenę i weryfikację logiki sterowania oraz łatwe porównanie alternatywnych projektów obejmujących różne rodzaje sterowania sygnalizacją świetlną.

LITERATURA

- [1] Boillot F., Midenet S., Pierrelée J.C.: The real-time urban traffic control system CRONOS: Algorithm and experiments. *Transportation Research Part C*, Vol. 14, No 1, Elsevier (2006)
- [2] Bretherton, R. D., Bodger M., Baber N.: SCOOT – Managing Congestion Communications and Control. *Proc. of ITS World Congress*, San Francisco (2005)
- [3] Mauro, V., DiTaranto, C.: UTOPIA. *Control, Computers, Communications in Transportation: Selected Papers from the IFAC Symposium*, Pergamon Press (1990)
- [4] Mirchandani, P.B., Head, K. L.: RHODES: A Real-Time Traffic Signal Control System: Architecture, Algorithms and Analysis. *Transportation Research Part C*, Vol. 9 No 6, Elsevier (2001)
- [5] Liu, Z.: A Survey of Intelligence Methods in Urban Traffic Signal Control. *Int. J. of Computer Science and Network Security*, Vol.7 No.7, (2007)
- [6] Chen, X., Yang, Z.-S., Wang, H.-Y.: A Multi-agent Urban Traffic Control System Cooperated with Dynamic Route Guidance. *Proc. of the Fifth Int. Conf. on Machine Learning and Cybernetics*, IEEE, Dalian (2006)
- [7] Jia, L., Yang, L., Kong, Q., Lin, S.: Study of Artificial Immune Clustering Algorithm and Its Applications to Urban Traffic Control. *Int. J. of Information Technology*, Vol.12, No.3, WASET (2006)
- [8] Niittymäki, J. P.: Fuzzy Traffic Signal Control. In Patriksson, M., Labbé, M. (Eds.) *Applied Optimization. Transportation Planning*. Kluwer Academic Publishers, New York, Boston, Dordrecht, London, Moscow (2002)
- [9] Teodorović, D., Varadarajan, V., Popović, J., Chinnaswamy M., Ramaraj, S.: Dynamic programming—neural network real-time traffic adaptive signal control algorithm. *Annals of Operations Research*, Vol. 143, No. 1, Springer Netherlands (2006)
- [10] Turky, A. M., Ahmad, M. S., Yusoff, M. Z. M., Hammad, B. T.: Using Genetic Algorithm for Traffic Light Control System with a Pedestrian Crossing. *RSKT 2009, LNCS 5589*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg (2009)
- [11] Wie, J., Wang, A. Du, N.: Study of self-organizing control of traffic signals in an urban network based on cellular automata. *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol. 54, No. 2, IEEE (2005)
- [12] Highway Capacity Manual 2000, Transportation Research Board, National Research Council, Washington D.C. 200
- [13] Burrow I.: OSCADY – a computer program to model capacities, queues and delays at isolated traffic signal junctions. *TRRL Report RR*, 1987

- [14] HBS 2001 Handbuch für die Bemessung von Straßenverkehrsanlagen. Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen e.V., Köln 2001
- [15] Akcelik R. Associates Pty Ltd: SIDRA Traffic Model Reference Guide, 2002
- [16] Teply S., et al.: Canadian Capacity Guide for signalized Intersections, Institute of Transportation Engineering, 2nd edition, 1995
- [17] Brude U., Hedman K-O., et al.: Design of Major Urban Junctions – Comprehensive Report Swedish National Road and Transport Research Institute, VIT EC Research 1998
- [18] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 3 lipca 2003r., w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach. Dz. U. Nr 220 z dnia 23 grudnia 2003 r., poz. 2181.
- [19] Tracz M., et al.: Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, Politechnika Krakowska, 2004
- [20] Boxill S.A., Yu L.: An Evaluation of Traffic Simulation Models for Supporting ITS Development, Center for Transportation Training and Research, Texas Southern University, USA, 2000.
- [21] Burghout W.: Hybrid Microscopic–Mesoscopic Traffic Simulation, Doctoral Dissertation, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.
- [22] AIMSUN. URL: <http://www.aimsun.com>. Accessed on September 13, 2008.
- [23] Trafficware Ltd. URL: <http://www.trafficware.com>. Accessed on September 13, 2008.
- [24] Ni D.: Panorama of Transportation Simulation, Georgia Institute of Technology, USA, 2001, URL: <http://gte710q.tripod.com/Research/panorama.pdf>
- [25] Prevedouros P.D., Wang Y.: Simulation of a Large Freeway/Arterial Network with CORSIM, INTEGRATION, and WATsim, Transportation Research Record, 1678(1999), pp. 197–207
- [26] VISSIM 5.00. User Manual, PTV Planung Transport Verkehr, Karlsruhe, Germany, 2007.
- [27] Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności,
- [28] Crossig. User Manual Version 3.70, PTV AG Stumpfstr.1, Karlsruhe, Germany, 20070.