

Jerzy SKORWIDER, Stanisław KRAWIEC, Leszek CZERWIŃSKI

SYMULACJA STRATEGII STEROWANIA SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA NA SKRZYŻOWANIU

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodologię symulacyjnego wyboru najlepszej strategii sterowania sygnalizacją świetlną na skrzyżowaniu. Dla dynamicznie definiowanej struktury geometrycznej i ruchowej skrzyżowania na podstawie eksperymentów symulacyjnych można wybrać strategię, która jest optymalna z punktu widzenia wskaźników ruchu przewidzianych do oceny płynności ruchu. W artykule przedstawiono 4 strategię: cykliczną stałoczasową, cykliczną akomodacyjną, acykliczną typu „all red” oraz acykliczną typu „preference” dla nowo zrealizowanego sterowania sygnalizacją świetlną w jednym z miast GOP.

SIMULATION STRATEGIES OF THE CROSSROAD SIGNALS CONTROL

Summary. The paper presents the simulation algorithms that allow selecting the optimal strategies for the crossroad lights control. The flexible model of the crossroad geometry and vehicles flow allows the designer to choose the most optimal solution for the control strategy, by the simulation experiments. The quality of the traffic stream is analysed under the simulation procedures according to the stream coefficients manipulation. The paper also presents the comparison results of four the traffic control strategies, as: fixed-time cyclic control, adaptation cyclic control, acyclic control “all red” and acyclic control “preference” strategy for the same new made intersection.

1. WSTĘP

Badanie rozwiązań stosowanych w układach sterowania ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną można realizować za pomocą odpowiednich narzędzi umożliwiających symulację wszystkich procesów zachodzących na badanym skrzyżowaniu. Można dla tych celów budować model symulacyjny konkretnego skrzyżowania lub grupy skrzyżowań, albo zbudować i użytkować model symulacyjny ruchu umożliwiający dynamiczne (w sposób gra-

ficzny) definiowanie parametrów skrzyżowania, takich jak struktura geometryczna i ruchowa oraz parametry sygnalizacji.

2. MODELOWANIE SKRZYŻOWAŃ

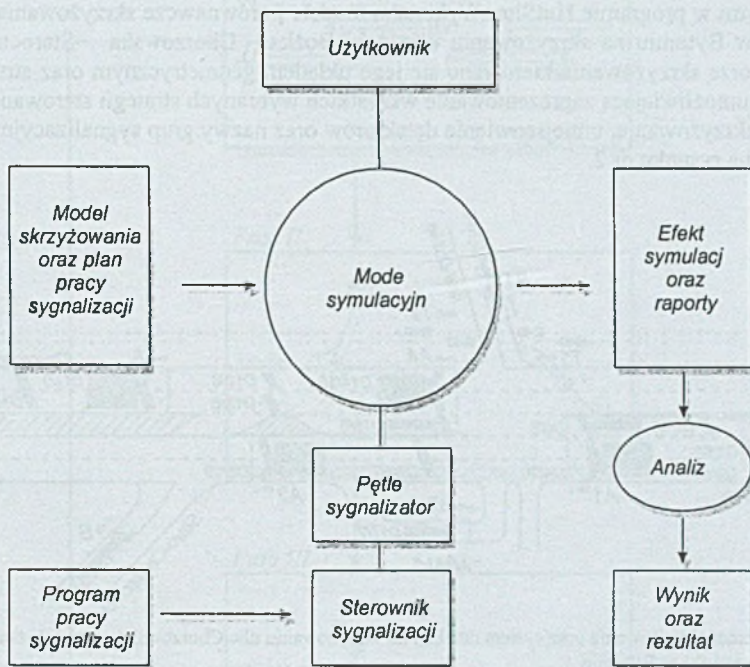
Dynamiczne definiowanie parametrów skrzyżowania, czyli budowa modelu skrzyżowania w takim symulatorze, polega na korzystaniu z gotowych elementów udostępnionych w programie oraz naniesieniu wzajemnych powiązań pomiędzy poszczególnymi elementami. Opis procedury tworzenia modelu można podzielić na kilka etapów. Pierwszym z nich jest naniesienie żądanej geometrii skrzyżowania, np.: poprzez wyrysowanie torów jazdy pojazdów. Następnie na tak skonstruowany model nanosi się generatory ruchu, które należy połączyć z początkami torów jazdy. Kolejnym etapem jest stworzenie połączeń pomiędzy poszczególnymi torami jazdy i nadanie numerów wszystkim generatorom. Następnie tworzy się struktury kierunkowe dla całego modelu poprzez naniesienie żądanych przepływów pojazdów w sieci modelu. W zależności od tego, czy dany model ma zawierać sygnalizację świetlną, nanosi się sygnalizatory, które następnie należy połączyć w żądanych miejscach z torami ruchu pojazdów. W przypadku tworzenia modelu skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej nanosi się znaki i tworzy wzajemne podporządkowania. Ostatnim z etapów tworzenia modelu jest stworzenie planu pracy sygnalizacji świetlnej – o ile model zawiera skrzyżowanie z sygnalizacją – oraz, zależnie od rodzaju sygnalizacji, naniesienie w odpowiednich miejscach detektorów dla pojazdów i przycisków dla pieszych.

Idealny symulator ruchu może być używany do sprawdzenia i monitoringu funkcjonalności działania pracy sygnalizacji świetlnej oraz powinien umożliwiać porównywanie różnych strategii sterowania sygnalizacją. Program powinien służyć jako narzędzie do symulacji ruchu zarówno na skrzyżowaniach odosobnionych, jak i pracujących w koordynacji z innymi sygnalizacjami oraz powinien umożliwiać hardwareową współpracę z elementami zewnętrznymi, np. z zewnętrznym symulatorem sterownika.

W czasie trwania eksperymentów symulacyjnych możliwe muszą być obserwowanie zachowania się sygnalizacji świetlnej do panujących warunków ruchowych na skrzyżowaniu oraz ocena wdrożona aktualnie przyjętej strategii sterowania ruchem. Niezależnie od oceny wdrożonej symulator musi umożliwiać analizę istotnych parametrów zarówno pracy sygnalizacji, jak i sytuacji ruchowej na skrzyżowaniu na podstawie zrealizowanych eksperymentów sygnalizacyjnych. Minimalny zakres tych parametrów powinien obejmować:

- opóźnienia: średnie, maksymalne i minimalne dla każdej z grup $[s]$,
- zatrzymania pojazdów przed sygnalizatorem – światło czerwone $[\%]$,
- brak zatrzymań – przejazd bez zatrzymania na czerwonym świetle $[\%]$,
- zmiana pasa ruchu $[\%]$,
- ilość zliczonych cykli dla każdej z grup,
- długości światła zielonego (wartość średnią, maksymalną oraz minimalną) dla każdej z grup $[s]$,
- długości cyklu (wartość średnią, maksymalną oraz minimalną) $[s]$,
- długość kolejki (wartość średnią, maksymalną oraz minimalną) dla każdej z grup $[poj./cykl]$,
- informacje na temat średniej prędkości podróży od źródła (generatora) do ujścia $[km/h]$.

Na podstawie przedstawionych informacji możliwa jest szczegółowa interpretacja oraz analiza przyjętego planu pracy sygnalizacji oraz ocena prawidłowości działania przyjętego systemu detekcji.



Rys. 1. Schemat blokowy symulatora ruchu

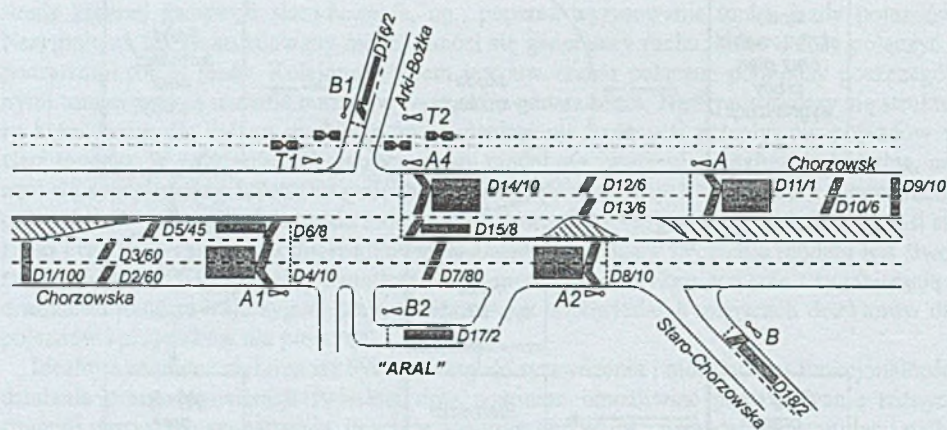
Fig. 1. Traffic simulator block diagram

W wielu krajach inżynierowie ruchu korzystają z różnych narzędzi symulacyjnych. Do najbardziej znanych i cenionych symulatorów ruchu zaliczyć można następujące programy [<http://www.its.leeds.ac.uk/smartest/links.html>]:

- AIMSUN2 – mikrosymulator, UPC Barcelona
- TRAFFICQ – mikrosymulator, MVA
- MicroSim – mikrosymulator, Uniwersytet w Kolonii
- STEER – mikrosymulator, Uniwersytet w York
- HutSim – mikrosymulator, Politechnika w Helsinkach
- SimTraffic – narzędzie symulacyjne, TrafficWare
- VisSim – mikrosymulator, PTV System Niemcy
- FOSIM – mikrosymulator, Politechnika w Delft
- PELOPS – program symulacyjny, Instytut Pojazdów Aachen
- Paramics – mikrosymulator, Edinburgh Parallel
- PadSim – mikrosymulator, Uniwersytet w Nottingham

3. EKSPERYMENTY SYMULACYJNE

W celu porównania możliwości oraz wydajności poszczególnych strategii sterowania ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną posłużono się modelami symulacyjnymi wykonanymi w programie HutSim. Wykonano modele porównawcze skrzyżowania znajdującego się w Bytomiu na skrzyżowaniu ulic Arki Bożka – Chorzowska – Starochorzowska. Przy wyborze skrzyżowania kierowano się jego układem geometrycznym oraz strukturą kierunkową, umożliwiającą zaprezentowanie wszystkich wybranych strategii sterowania ruchem. Schemat skrzyżowania, umiejscowienie detektorów oraz nazwy grup sygnalizacyjnych przedstawiono na rysunku nr 2.



Rys. 2. Schemat skrzyżowania oraz system detekcji na skrzyżowaniu ulic Chorzowska – Arki Bożka – Starochorzowska w Bytomiu

Fig. 2. Arki Bozka-Chorzowska-Starochorzowska intersection diagram and detection system (Bytom)

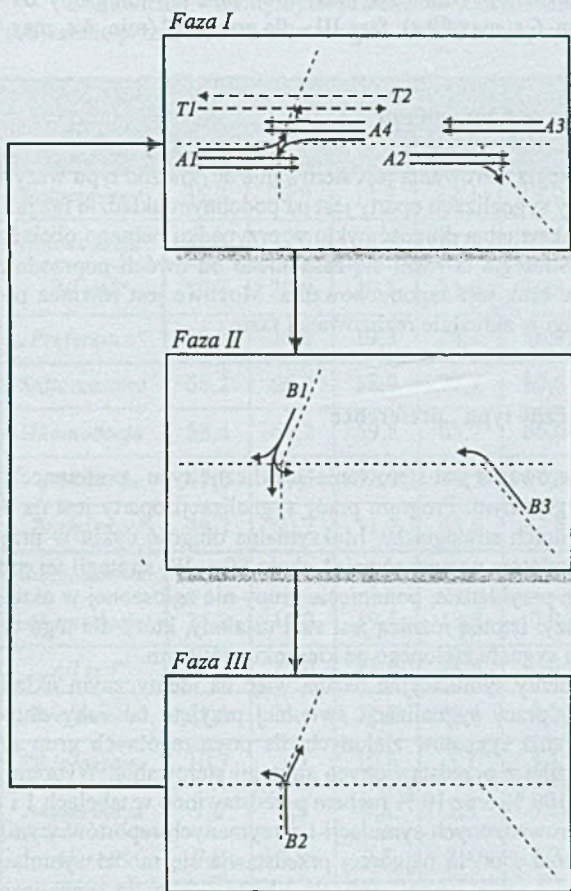
Grupy sygnalizacyjne na kierunku głównym zostały opisane jako $A1$, $A2$, $A3$ i $A4$, natomiast na kierunkach bocznych jako $B1$, $B2$ oraz $B3$. Detektory pojazdów (pętla detekcyjna) opisane są za pomocą oznaczenia Dx/y , gdzie x oznacza kolejny numer detektora, natomiast y – wyraża odległość od linii warunkowego zatrzymania.

Przyjęty system detekcji umożliwia obserwację pojazdów w odległości od 100 m od linii warunkowego zatrzymania na kierunku głównym dla sygnalizacji acyklicznej.

W przypadku sygnalizacji akomodacyjnej pierwsza pętla detekcyjna znajduje się na 60 m od linii warunkowego zatrzymania.

Kolejne detektory umieszczono w odległości 60 oraz 10 m przed linią warunkowego zatrzymania dla relacji na wprost oraz w odległości 45 i 8 m przed linią warunkowego zatrzymania dla relacji lewoskrętnych. Na wlotach bocznych zainstalowane zostały tylko detektory obecności w postaci jednej pętli o długości 18 m.

W celu porównania strategii programu acykliczne oraz program akomodacyjny uproszczono do układu faz pokazanych na rysunku nr 3.



Rys. 3. Układ faz dla sterowania cyklicznego stałoczasowego

Fig. 3. Phase ring for cyclic control

3.1. Sterowanie cykliczne stałoczasowe

Jako pierwszą strategię sterowania przyjęto sterowanie stałoczasowe z jednym programem o długości cyklu 80 s. Długości poszczególnych faz przyjęto następująco: faza I – 38 s, faza II – 18 s, faza III – 10 s.

3.2. Sterowanie cykliczne akomodacyjne

Kolejną strategią sterowania jest sterowanie cykliczne akomodacyjne z programem o długości cyklu zmieniającym się w granicach 32-80 s. Zastosowano program z podobnym układem faz jak w przypadku sterowania cyklicznego stałoczasowego, z tą jednak różnicą, iż w przypadku braku zgłoszeń dla grup tramwajowych $T1$ i $T2$ sygnał zielony nie jest podawany.

Minimalne i maksymalne długości światła zielonego dla poszczególnych faz przyjęto następująco: faza I - dla grup *A1-A4* (min. 8 s, max.38 s); faza II - dla grupy *B1* (min. 6 s, max 16 s), dla grupy *B3* (min. 6 s, max 20 s); faza III - dla grupy *B2* (min. 4 s, max 10 s).

3.3. Sterowanie acykliczne typu „all red”

Kolejną opisaną strategią sterowania jest sterowanie acykliczne typu wszystko czerwone – „all red”. Program pracy sygnalizacji oparty jest na podobnym układzie faz jak w poprzednich dwóch strategiach. Maksymalna długość cyklu w przypadku pełnego obciążenia wszystkich wlotów wynosi 80 s. Strategia ta różni się zasadniczo od dwóch poprzednich możliwością pomijania faz, na które brak jest zapotrzebowania. Możliwe jest również pominięcie grupy nie zgłoszonej do obsługi w aktualnie realizowanej fazie.

3.4. Sterowanie acykliczne typu „preference”

Ostatnią strategią sterowania jest sterowanie acykliczne typu „preference” – stan ustalony „zielone” na kierunku głównym. Program pracy sygnalizacji oparty jest na podobnym układzie faz, jak w poprzednich strategiach. Maksymalna długość cyklu w przypadku pełnego obciążenia wszystkich wlotów wynosi również około 80 s. W strategii tej możliwe jest również, jak w poprzednim przykładzie, pominięcie grupy nie zgłoszonej w aktualnie realizowanej fazie oraz samej fazy. Istotną różnicą jest stan ustalony, który dla tego typu sygnalizacji polega na wyświetleniu sygnału zielonego na kierunku głównym.

Wszystkie eksperymenty symulacyjne bazują więc na identycznym układzie drogowym. Zastosowane programy pracy sygnalizacji świetlnej przyjęto tak, aby długość cyklu oraz maksymalne czasy trwania sygnałów zielonych dla poszczególnych grup sygnalizacyjnych były identyczne dla każdej z przedstawionych strategii sterowania. Wybrane wyniki porównawcze dla obciążenia 100 % oraz 10 % ruchem przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Na podstawie przeprowadzonych symulacji i otrzymanych raportów wynika, że niezależnie od stopnia obciążenia modelu najgorzej przedstawia się model symulacyjny oparty na stałoczasowym programie pracy sygnalizacji. Wynika to z faktu, iż sygnalizacja pracująca na podstawie tej strategii nie potrafi dostosować się do ruchu, a jej program oraz czasy trwania sygnałów zielonych są zawsze stałe. Najlepsze wartości otrzymano dla sygnalizacji acyklicznych obu typów, z jedną tylko różnicą. Sygnalizacja acykliczna typu „all red”, jeśli chodzi o 100% obciążenia ruchem modelu, pracowała niemal identycznie jak sygnalizacja acykliczna typu „preference”. Istotne zmiany można zauważyć jedynie przy 10% obciążeniu modelu, kiedy to sygnał zielony jest wyświetlany na kierunku głównym nawet wtedy, gdy nie ma zgłoszeń na pętłach należących do tych grup. Takie rozwiązanie powoduje, iż trudno jest ustalić długość cyklu w przypadku tak pracującej sygnalizacji, stąd też odpowiednie miejsca w tabelach porównawczych nie posiadają wartości.

Tabela 1

Zestawienie ważniejszych parametrów dla modelu.
Porównanie przedstawionych strategii - 100 % obciążenia ruchem

Parametr	Strategia	Nazwa grupy						
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
Średnie opóźnienie [s]	Staloczasowe	35,2	26,9	32,3	32,1	34,0	32,9	38,7
	Akomodacja	31,5	28,5	28,9	27,9	32,3	44,1	45,5
	„All red”	19,7	20,9	19,8	23,6	36,9	27,8	24,9
	„Preference”	19,8	20,2	19,3	24,2	38,9	28,8	25,4
Zatrzymanie na czerwonym świetle [%]	Staloczasowe	68,2	66,2	58,9	77,1	80,6	69,2	97,5
	Akomodacja	58,4	63,2	59,8	65,7	86,6	96,2	95,4
	„All red”	49,8	51,5	52,0	48,5	87,5	96,2	80,0
	„Preference”	49,2	50,2	51,2	48,6	87,5	96,2	80,0
Przejazd bez zatrzymania [%]	Staloczasowe	7,8	8,9	7,3	5,7	0,0	0,0	0,0
	Akomodacja	25,2	16,2	19,5	13,6	0,0	0,0	0,0
	„All red”	21,3	25,6	21,5	28,5	0,0	0,0	0,0
	„Preference”	21,3	25,6	21,5	28,5	0,0	0,0	0,0
Średnia kolejka na cykl [poł/cykl]	Staloczasowe	10,7	3,3	10,5	3,7	3,1	0,4	4,6
	Akomodacja	9,6	2,8	8,8	3,3	3,2	1,0	3,8
	„All red”	9,9	2,9	9,3	3,4	3,2	1,1	3,8
	„Preference”	9,9	2,9	9,3	3,4	3,2	1,1	3,8
Średnia długość zielonego [s]	Staloczasowe	38,0	38,0	38,0	38,0	18,0	10,0	18,0
	Akomodacja	38,6	38,6	38,6	38,6	13,0	6,7	13,5
	„All red”	38,6	38,6	38,6	38,6	12,4	6,4	14,2
	„Preference”	38,6	38,6	38,6	38,6	12,4	6,4	14,2
Średnia długość cyklu [s]	Staloczasowe	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
	Akomodacja	79,9	80,0	80,1	80,0	79,6	80,0	80,0
	„All red”	77,2	77,2	77,2	77,2	77,2	79,6	77,2
	„Preference”	77,2	77,2	77,2	77,2	77,2	84,2	77,2

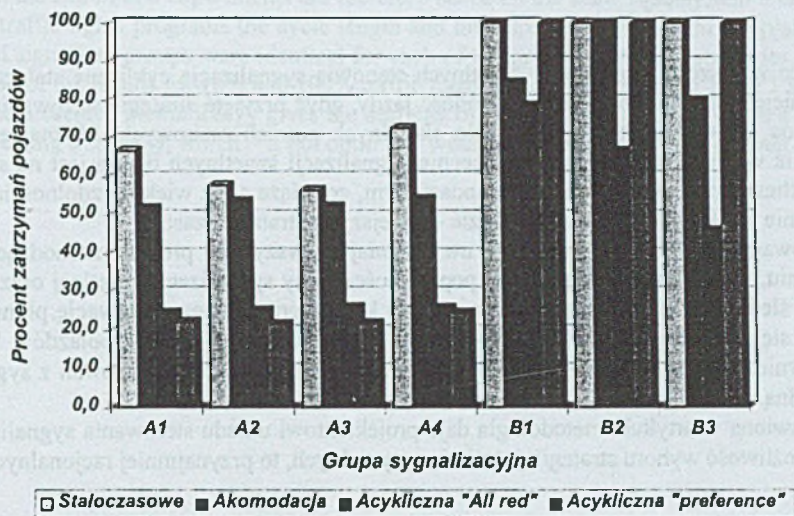
Źródło: Raport z programu HutSim

Tabela 2

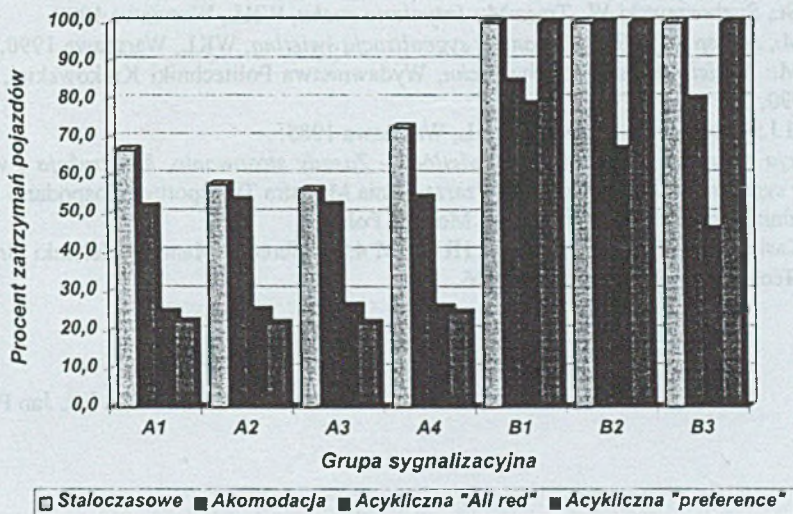
Zestawienie ważniejszych parametrów dla modelu.
Porównanie przedstawionych strategii – 10 % obciążenia ruchem

Parametr	Strategia	Nazwa grupy						
		A1	A2	A3	A4	B1	B2	B3
Średnie opóźnienie [s]	Staloczasowe	20,7	21,1	21,6	24,7	22,1	37,5	37,5
	Akomodacja	23,1	17,9	16,9	18,5	30,1	29,5	19,4
	„All red”	9,8	7,8	8,2	10,8	20,1	18,1	17,8
	„Preference”	8,4	7,0	7,1	6,8	24,6	13,1	18,7
Zatrzymanie na czerwonym świetle [%]	Staloczasowe	66,7	57,7	56,3	72,7	100,0	100,0	100,0
	Akomodacja	51,6	53,5	52,1	54,1	84,5	100,0	79,8
	„All red”	24,6	25,1	26,1	25,8	78,6	66,7	45,8
	„Preference”	22,2	21,6	21,8	24,5	100,0	100,0	100,0
Przejazd bez zatrzymania [%]	Staloczasowe	22,3	26,9	18,5	27,5	0,0	0,0	0,0
	Akomodacja	21,6	23,6	23,5	22,8	2,5	0,0	0,0
	„All red”	38,2	33,9	35,1	39,7	0,0	0,0	0,0
	„Preference”	54,6	52,6	62,5	64,3	0,0	0,0	0,0
Średnia kolejka na cykl [poł/cykl]	Staloczasowe	1,2	0,7	1,2	0,8	0,3	0,0	0,4
	Akomodacja	0,7	0,4	0,4	0,5	0,2	0,1	0,3
	„All red”	0,1	0,1	0,1	0,1	1,0	0,3	1,1
	„Preference”	0,1	0,1	0,1	0,1	1,1	1,0	1,1
Średnia długość złączonego [s]	Staloczasowe	38,0	38,0	38,0	38,0	18,0	10,0	18,0
	Akomodacja	19,9	19,9	19,3	19,8	7,4	5,3	9,7
	„All red”	18,8	17,8	21,9	20,5	6,9	6,2	7,1
	„Preference”	93,1	145,0	96,8	153,2	7,4	6,2	7,1
Średnia długość cyklu [s]	Staloczasowe	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0	80,0
	Akomodacja	53,4	53,4	53,4	53,4	54,4	53,9	53,9
	„All red”	49,7	52,3	49,9	51,6	55,3	58,1	51,0
	„Preference”	-	-	-	-	-	-	-

Źródło: Raport z programu HutSim



Wykres 1. Charakterystyka ruchowa – procent zatrzymań. Porównanie przedstawionych strategii – 100 % obciążenia ruchem



Wykres 2. Charakterystyka ruchowa – procent zatrzymań. Porównanie przedstawionych strategii – 10 % obciążenia ruchem

4. PODSUMOWANIE

W Polsce większość sygnalizacji świetlnych stanowią sygnalizacje cykliczne stałoczasowe, które niejednokrotnie komplikują płynność jazdy, gdyż przyjęte strategie sterowania nie pozwalają na dostosowanie programów do aktualnych potrzeb ruchowych. Można jednak zauważyć, iż większość instalowanych obecnie sygnalizacji świetlnych oparta jest na sterowaniu acyklicznym, a przynajmniej akomodacyjnym, co wiąże się z większą zdolnością dostosowywania się do ruchu, a co za tym idzie - mniejszymi stratami czasu.

Proponowane narzędzia symulacyjne, uwzględniające wszystkie procesy zachodzące na skrzyżowaniu, umożliwiają pełną analizę poprawności pracy sygnalizacji świetlnej oraz dają możliwość śledzenia pracy sygnalizacji na ekranie komputera poprzez obserwację płynności poruszania się pojazdów oraz analizę powstawania i grupowania się kolejek pojazdów. Udogodnienia również raporty o stanie parametrów charakterystycznych dla skrzyżowań z sygnalizacją świetlną.

Przedstawiona w artykule metodologia daje projektantowi układu sterowania sygnalizacją świetlną możliwość wyboru strategii, jeżeli nie optymalnych, to przynajmniej racjonalnych.

LITERATURA

1. Zdanowicz K., Monkiewicz Sł., Sama St.: *Wytyczne projektowania ulic*, Instytut Badawczy Dróg i Mostów, Warszawa 1992.
2. Datka St., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu*, WKŁ, Warszawa 1997.
3. Tracz M., Allsop R.E.: *Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną*, WKŁ, Warszawa 1990.
4. Tracz M.: *Modelowanie procesów ruchu*, Wydawnictwa Politechniki Krakowskiej, Kraków 1990.
5. Podoski J.: *Transport w miastach*, WKŁ, Warszawa 1985.
6. *Instrukcja o drogowej sygnalizacji świetlnej – Zasady stosowania, konstrukcja i wzory barwne sygnałów* – Załącznik nr 3 do zarządzenia Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 3 marca 1994 r. (poz.120), Monitor Polski.
7. Sane, Kari Juhani, Kosonen, Iisakki: „HUTSIM 4.2 Reference Manual” Helsinki University of Technology, Espoo Finland 1996.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Jan Piecha

Abstract

The comparison of models of the intersection Arki Bozka-Chorzowska-Starochorzowska in Bytom (Poland) was studied. The choice of the intersection was determined by its geometry and directional structure, allowing the presentation of all preselected traffic control strategies.

All the simulation experiments are therefore based on the same road system and for all the used traffic lights programs the cycle length and the maximum green light intervals for individual signalling groups were identical for each of the presented control strategies. The comparison of the results for 10% and 100% traffic loading cases are shown in Table 1 and 2.

The presented methodology gives the designer of a traffic light control system a possibility of selecting a strategy, which – if not optimal – would be at least rational in a given case.