

Michał MACIEJEWSKI¹
Paweł POLASZEK¹

OPTYMALIZACJA SYGNALIZACJI ŚWIETLNEJ DLA ZŁOŻONEGO SKRZYŻOWANIA O RUCHU OKRĘŻNYM

Celem artykułu jest skrótowe przedstawienie wyników próby znalezienia bardziej efektywnego sposobu sterowania ruchem na Rondzie Rataje w Poznaniu, poprzez zmianę programu sygnalizacji świetlnej. W tym celu zbadano istniejące warianty programu sterowania oraz zaproponowano dwa autorskie programy sygnalizacji świetlnej (dostosowane do godzin przedpołudniowych i popołudniowych). Analizy prowadzono drogą symulacyjną korzystając z systemu VISSIM do mikrosymulacji ruchu drogowego. Po przeanalizowaniu wyników symulacji stwierdzono, że stworzone programy sygnalizacji świetlnej charakteryzowały się bardzo dobrą efektywnością obsługi pojazdów oczekujących w kolejce, co z kolei rzutowało na lepszą przepustowość ronda.

OPTIMIZATION OF TRAFFIC LIGHTS CONTROL FOR A COMPLEX ROUNDABOUT

The aim of the paper is to present the results of an attempt to find a more effective way for traffic control at Rondo Rataje in Poznan by means of changing the traffic light control programme. For this purpose, the existing variants of the control programme were tested and two new programmes suited for the period of the morning and evening rush hours were proposed. The research was based on simulation approach and carried out with the VISSIM traffic flow microsimulation system. The results showed that the proposed traffic light programmes provided highly effective service of vehicles awaiting in queues at the roundabout and improved the capacity of the roundabout.

1. WSTĘP

Optymalizacja organizacji ruchu drogowego na złożonych skrzyżowaniach o ruchu okrężnym nie jest zadaniem trywialnym i stanowi istotny problem dla inżynierów ruchu. W przypadku prostych pojedynczych skrzyżowań można mówić o pewnych regułach

¹Politechnika Poznańska, Wydział Maszyn Roboczych i Transportu, Instytut Maszyn Roboczych i Pojazdów Samochodowych, ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. (61) 665-2775, -2709, fax (61) 665-2736
E-mail: michal.maciejewski@put.poznan.pl

konstruowania programu sterowania sygnalizacją świetlną. Niestety przy złożonych, wielopasowych skrzyżowaniach o ruchu okrężnym, stanowiących również skrzyżowanie dla ruchu szynowego, trudno mówić o konkretnych zasadach dotyczących organizacji ruchu i sygnalizacji świetlnej i każdy przypadek trzeba rozpatrzyć indywidualnie.

Z uwagi, że tego typu ronda są zlokalizowane zazwyczaj w miejscach przecięcia się dróg cechujących się dużym natężeniem ruchu, często dochodzi do kongestii. Dlatego należy szczegółowo rozważyć wpływ organizacji ruchu na długości kolejek pojazdów na poszczególnych wlotach skrzyżowania. Ruch na skrzyżowaniach zmienia się w sposób dynamiczny – natężenia potoków pojazdów wpadających do skrzyżowania są zmienne i zależą od czynników cyklicznych, tj. pory roku, dnia i pory dnia, a także acyklicznych, np. imprezy, remonty czy wypadki. Stąd też nie jest możliwe znalezienie statycznego programu sterowania sygnalizacją świetlną, który by był optymalny dla każdej chwili czasu. Sygnalizacja taka powinna być, w zależności od szczegółowych wymagań, stałoczasowa wieloprogramowa, zmiennoczasowa albo całkowicie adaptacyjna.

W przypadku tak skomplikowanych układów drogowych istotne jest również uwzględnienie ruchu pieszego, wraz z analizą możliwości zastosowania przejść bezkolizyjnych (naziemnych lub podziemnych).

2. OPTIMALIZACJA W OPARCIU O SYMULACJE MIKROSKOPOWĄ

Z uwagi na brak możliwości wyznaczenia optymalnego programu sygnalizacji w sposób analityczny, w ramach badań zastosowano metodę iteracyjną polegającą na wykonywaniu w pętli po kolei następujących kroków:

1. konfiguracja sygnalizacji zgodnie z parametrami
2. uruchomienie symulacji mikroskopowej
3. przetworzenie wyników symulacji
4. ocena sygnalizacji według wybranych miar kryteriów
5. zmiana parametrów sygnalizacji świetlnej

W przypadku optymalizacji sterowania sygnalizacją świetlną mamy do czynienia z dwoma podstawowymi kryteriami: *bezpieczeństwo* i *komfort* uczestników ruchu. Aby opisać stopień bezpieczeństwa lub komfortu można stosować rozmaite miary. Dodatkową komplikację stanowi fakt, że z uwagi, iż w ruchu ulicznym bierze udział równocześnie wiele typów użytkowników, nie wszystkie miary będą wyrażały interesy wszystkich użytkowników. Niektóre mogą faworyzować kierowców pojazdów drogowych, inne pasażerów komunikacji zbiorowej, a zwłaszcza szynowej, a jeszcze inne pieszych. Tak więc w ogólności mamy do czynienia z problemem optymalizacji wielokryterialnej [1].

Przykładowymi kryteriami branymi pod uwagę z punktu widzenia efektywności ruchu są [2]:

- średnie opóźnienie na uczestnika ruchu (najpopularniejsze kryterium),
- maksymalne indywidualne opóźnienie,
- procentowy uczestników zatrzymanych podczas poruszania się w systemie,
- średnia liczba zatrzymań dla przeciętnej trasy,
- przepustowość skrzyżowań,
- przepustowość systemu,
- średni czas przejazdu,

- maksymalny czas przejazdu.

W ramach optymalizacji przeszukiwania przestrzeni rozwiązań, a więc przestrzeni wszystkich potencjalnych programów sygnalizacji, można wykonywać w oparciu o zestaw parametrów opisujących poszczególne sygnały zielone (np. offset, split). A więc jest to optymalizacja parametryczna. W tym przypadku najpierw należy w sposób arbitralny zaproponować schemat organizacji ruchu na rondzie, np. układ pasów, dozwolone manewry, miejsca sygnalizatorów. W przypadku optymalizacji sygnalizacji dla istniejącego ronda te dane są znane a priori. Jeśli rondo jest dopiero projektowane, wtedy należy przeprowadzić przedstawioną powyżej procedurę wielokrotnie, za każdym razem dla innego wariantu organizacji ruchu na skrzyżowaniu.

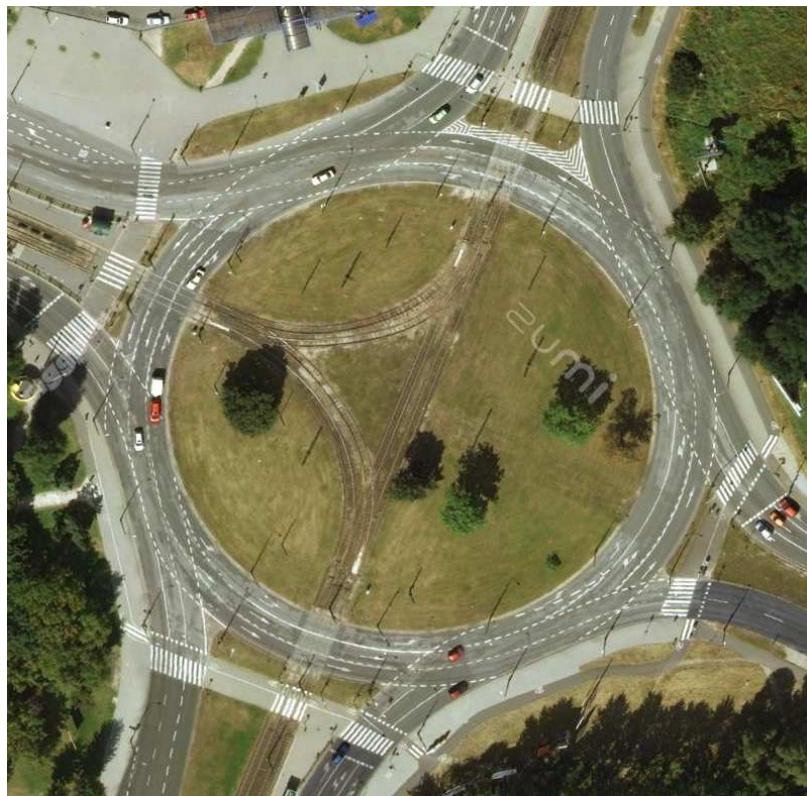
Bardzo istotny jest wybór odpowiedniego systemu mikrosymulacji ruchu drogowego, który pozwoli na przeprowadzenie precyzyjnej symulacji. Na podstawie wyników symulacji obliczane są miary spełnienia poszczególnych kryteriów, które to z kolei stanowią podstawę do dalszych modyfikacji parametrów w procesie optymalizacji. Jeśli zastosowane oprogramowanie do symulacji ruchu drogowego lub zbudowany w nim model skrzyżowania nie będą odpowiedniej jakości, dany program sygnalizacji świetlnej może być w rzeczywistości daleki od optimum.

W związku z powyższym po wyborze narzędzia do symulacji i zbudowaniu modelu skrzyżowania, należy w pierwszej kolejności przeprowadzić symulacje mające na celu weryfikację poprawności modelu i ewentualne dostrojenie parametrów lub struktury modelu w przypadku wystąpienia niezgodności symulowanego ruchu z rzeczywistym. Niestety w przypadku tworzenia modelu dla skrzyżowań nieistniejących sprawa jest bardziej trudna, a ocena weryfikacyjna modelu ma charakter bardziej subiektywny.

3. RONDO RATAJE W POZNANIU

Stosując przedstawioną powyżej metodykę, autorzy podjęli próbę przeprowadzenia optymalizacji sygnalizacji świetlnej dla Ronda Rataje. Jest to jedno z największych rond w Poznaniu leżące w obrębie dzielnicy Nowe Miasto, przez które przechodzą drogi krajowe 5 i 11. Łączna liczba pojazdów przejeżdżających przez Rondo Rataje w dzień roboczy wynosi ok. 50.000 i systematycznie rośnie z roku na rok. Aby sprostać tak dużemu natężeniu ruchu, Zarząd Dróg Miejskich w Poznaniu na bieżąco aktualizuje sygnalizację świetlną sterującą ruchem na rondzie. Obecnie stosowana jest sygnalizacja stałoczasowa wieloprogramowa. Niemniej jednak obserwacje poczynione przez autorów, jak również uwagi otrzymane od osób trzecich, wskazywały na pewne problemy związane z efektywnością programu sygnalizacji i stanowiły podstawę do podjęcia próby zaproponowania innego programu.

Na rys. 1. przedstawiono zdjęcie lotnicze Ronda Rataje ukazujące geometrię skrzyżowania, układ pasów, rozmieszczenie sygnalizatorów, przejść dla pieszych oraz torów tramwajowych. Dokładna analiza struktury ronda jest omówiona w pracy [3].



Rys.1. Zdjęcie lotnicze Ronda Rataje w Poznaniu

4. MODEL RUCHU NA RONDZIE

4.1 VISSIM

Do mikroskopowej symulacji ruchu zastosowano system VISSIM niemieckiej firmy PTV [4]. W zakresie modelowania jazdy za liderem zastosowano w nim psychofizjologiczny model zachowania kierowcy autorstwa Wiedemanna [5]. W modelu tym zawarto opis wpływu percepcji wykazywanej przez kierowców na proces podejmowania decyzji w zakresie wyboru prędkości jazdy. Również z prac Wiedemanna [6] wywodzi się oparty na regułach model zmiany pasa ruchu.

W systemie VISSIM nie stosuje się klasycznego podejścia do modelowania sieci drogowej za pomocą grafu skierowanego składającego się z wierzchołków (węzłów) i krawędzi (odcinków). Sieć drogową buduje się za pomocą jednokierunkowych odcinków połączonych za pomocą łączników (*connectors*). Podejście to umożliwia modelowanie niemal dowolnych układów drogowych, w tym skrzyżowania o ruchu okrężnym, co jest praktycznie niemożliwe przy wykorzystaniu klasycznej reprezentacji grafowej.

System VISSIM cechuje się nie tylko dużą dokładnością modelowania geometrii i parametrów sieci drogowej, ale także umożliwia precyzyjne odwzorowanie ruchu pojazdów. W systemie możliwa jest symulacja pojazdów jednośladowych i szynowych, a także pieszych, co nie jest powszechnie spotykane w narzędziach służących mikrosymulacji przepływu ruchu. Ponadto możliwe jest zastosowanie dynamicznego rozkładu ruchu (dynamic traffic assignment), w ramach którego proces „uczenia się” kierowców przebiega w sposób iteracyjny [7].

Także w zakresie modelowania i symulacji sygnalizacji świetlnej system VISSIM posiada bogatą funkcjonalność. Poza tworzeniem sygnalizacji stałoczasowej czy zmiennoczasowej, możliwa jest współpraca z zewnętrznymi sterownikami sygnalizacji.

System VISSIM posiada olbrzymie możliwości wizualizacyjne w zakresie grafiki dwu- oraz trójwymiarowej, możliwe jest także tworzenie animacji 2D/3D przedstawiających przebieg symulacji z różnych ujęć kamery.

4.2 Struktura modelu

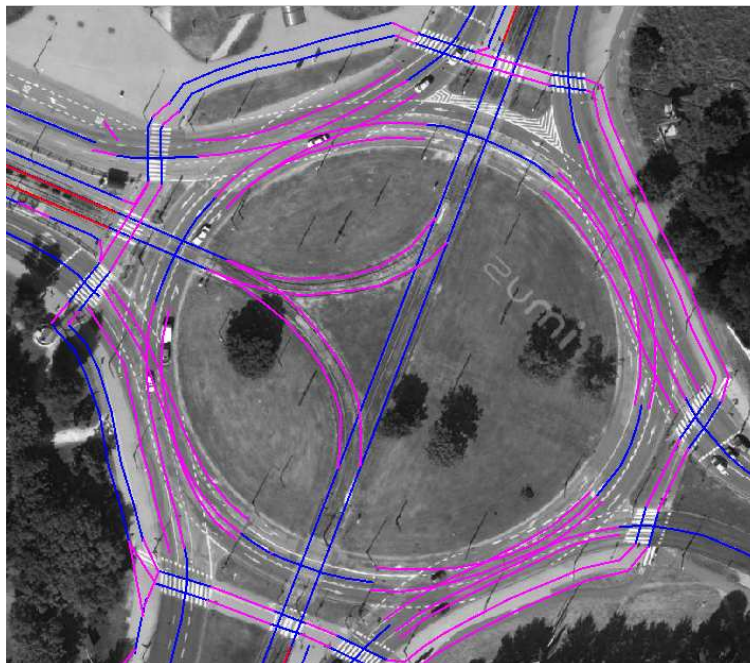
Centralny fragment modelu (obszar ronda bez dróg dojazdowych) został przedstawiony na rys. 2 na tle zdjęcia lotniczego. Każda jezdnia na wlotach, wylotach, przejścia dla pieszych oraz torowisko tramwajowe składa się z odcinków (kolor niebieski) połączonych łącznikami (kolor różowy). Przystanki komunikacji zbiorowej oznaczono kolorem czerwonym. Jezdnia jednokierunkowa wokół wyspy środkowej została podzielona na 4 odcinki.

W trakcie badań analizowano także alternatywne warianty struktury ronda. Przykładowo jezdnia jednokierunkowa wokół wyspy środkowej jako jeden zakrzywiony odcinek, którego początek i koniec połączony jest krótkim łącznikiem. Niestety taka struktura, jak również inne przebadane, nie umożliwiała w pełni zamodelować zachowania kierowców na rondzie oraz wszystkich ograniczeń zmiany pasów.

W trakcie budowy modelu istotnym zagadnieniem jest definiowanie priorytetów pól kolizji, a więc miejsc, gdzie przecinają się, łączą lub rozchodzą strumienie pojazdów. W przeciwieństwie do typowego przypadku ronda bez sygnalizacji świetlnej, dla stworzonego modelu ronda z sygnalizacją świetlną przyjęto priorytet dla pojazdów wjeżdżających na rondo.

4.3 Ruch drogowy

W celu oszacowania wielkości i rozkładu ruchu drogowego dokonano pomiarów natężenia ruchu na drogach dolotowych z rozróżnieniem na typy pojazdów: osobowe (O), dostawcze (D) i ciężarowe (C), oraz na typy manewrów: skręt w lewo (L), jazda na wprost (W) i skręt w prawo (P). Badania wykonano w godzinach porannego szczytu (tab. 1) oraz popołudniowego szczytu (tab. 2). Dodatkowo w modelu uwzględniono ruch tramwajowy i autobusowy (komunikacji zbiorowej) zgodnie z rozkładami jazdy.



Rys.2. Struktura modelu Ronda Rataje

Tab. 1. Zmierzone natężenie ruchu dla godzin przedpołudniowych

	Jana Pawła II			Krzywoustego (zachód)			Zamenhofska			Krzywoustego (wschód)		
	prawo	prosto	lewo	prawo	prosto	lewo	prawo	prosto	lewo	prawo	prosto	lewo
So	360	288	180	300	420	240	516	360	252	564	384	372
Sd	60	5	12	24	48	12	48	72	24	60	24	24
Sc	79	132	38	19	17	19	77	36	3	158	6	6
suma	499	425	230	343	485	271	641	468	279	782	414	402
całość	1154			1099			1388			1598		

Tab. 2. Zmierzone natężenie ruchu dla godzin popołudniowych

	Jana Pawła II			Krzywoustego (zachód)			Zamenhofska			Krzywoustego (wschód)		
	prawo	prosto	lewo	prawo	prosto	lewo	prawo	prosto	lewo	prawo	prosto	lewo
so	410	697	354	485	883	302	115	517	361	242	611	128
sd	17	26	26	8	37	19	5	24	12	19	28	8
sc	5	36	60	5	17	10	4	36	3	65	6	6
suma	432	759	440	498	937	331	124	577	376	326	645	142
całość	1631			1766			1077			1113		

4.4 Sygnalizacja świetlna

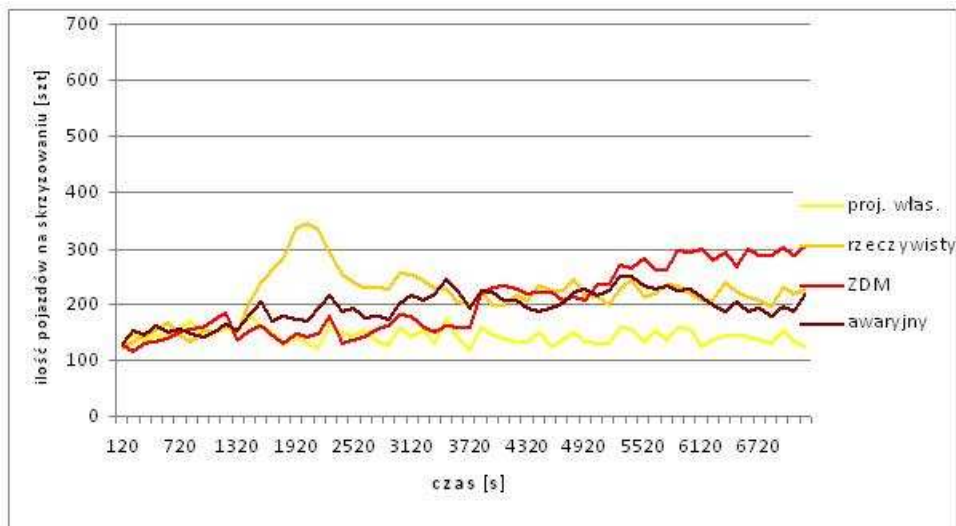
Stałoczasowe programy sygnalizacji świetlnej dla modelu Ronda Rataje zostały zrealizowane w aplikacji VISSIG (dodatek do systemu VISSIM). Dane o programach otrzymano z Zarządu Dróg Miejskich w Poznaniu (trzy warianty: poranny, popołudniowy i awaryjny). Niestety w trakcie badań okazało się, że rzeczywiste programy na Rondzie Rataje są niezgodne z otrzymanymi danymi. Dlatego konieczne było przeprowadzenie szczegółowej identyfikacji programów sterowania, zarówno w porze porannego jak i popołudniowego szczytu. Programy te różnią się między sobą przede wszystkim czasem trwania cyklu (od 70 s do 110 s) oraz czasem trwania poszczególnych sygnałów. W godzinach porannych dłużej sygnał zielony jest na wlotach z ulicy Zamenhofska oraz Krzywoustego (wschód), a z kolei w czasie popołudniowego szczytu komunikacyjnego dłużej sygnał zielony emitowany jest na wlotach z ulicy Jana Pawła II oraz Krzywoustego (zachód). Związane jest to ze zmienną wielkością natężenia ruchu na poszczególnych wlotach w zależności od pory dnia. Ponadto w ramach badań symulacyjnych zaproponowano autorskie programy sterowania sygnalizacją świetlną (dla przed- i popołudnia). Z uwagi na ograniczoną objętość artykułu, szczegółowe specyfikacje programów sygnalizacyjnych nie zostały zamieszczone w artykule, można je jednak znaleźć w pracy [3].

5. SYMULACYJNA OPTIMALIZACJA SYGNALIZACJI

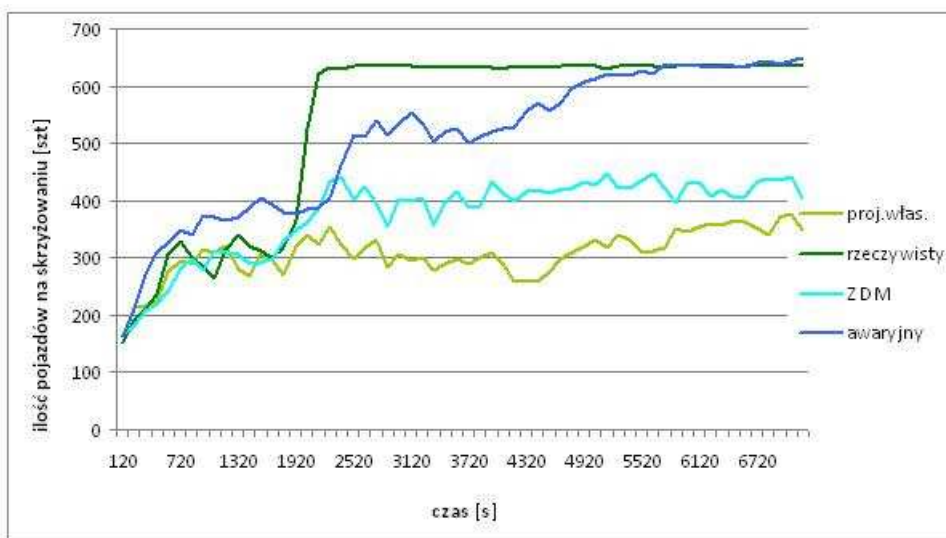
Zgodnie z zaproponowanym podejściem do optymalizacji, poszukiwanie optymalnych programów sygnalizacji świetlnej przeprowadzono za pomocą serii symulacyjnych badań, których wyniki stanowiły informację zwrotną mówiącą o jakości danego programu sygnalizacji. Symulacje trwały 7200 sekund i były przeprowadzane dla natężenia ruchu równemu 100%, 110% i 120% natężenia rzeczywistego, niezależnie dla obu okresów szczytów komunikacyjnych (tj. poranny i popołudniowy)

W celu określenia jakości proponowanej sygnalizacji przeprowadzono także symulacje ruchu przy założeniu sygnalizacji oficjalnej (wg dokumentacji ZDM), rzeczywistej (wg pomiarów) oraz programu awaryjnego (wg dokumentacji ZDM). Oczywiście badania te były wykonane dla obu pór dnia i dla każdego wariantu natężenia ruchu (100%, 110% i 120%). Jako podstawowe wskaźniki oceny programów sygnalizacji zastosowano przebiegi liczby pojazdów w sieci (tj. skrzyżowanie oraz wloty i wyloty) oraz długości kolejek na każdym z czterech wlotów.

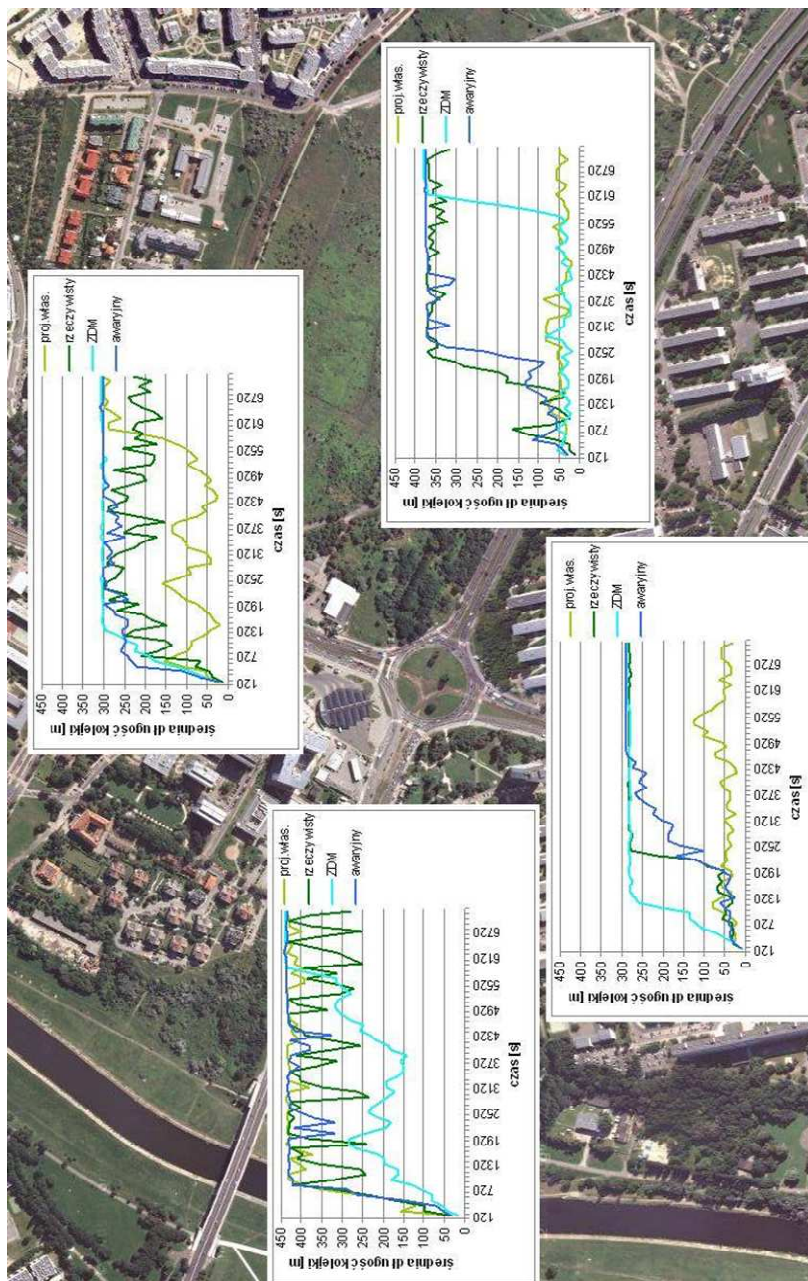
Szczegółowe wyniki i analizę dla wszystkich wariantów symulacji przedstawiono w pracy [3]. Poniżej zamieszczono wybrane wykresy ukazujące porównanie liczby pojazdów w sieci (rys. 3 – godziny poranne, 100% natężenia; rys. 4 – godziny popołudniowe, 120% natężenia) oraz długości kolejek na wlotach (rys. 5 – godziny popołudniowe, 120% natężenia). Na podstawie analiz porównawczych stwierdzono, że zaproponowane programy sygnalizacji świetlnej, zarówno dla godzin przedpołudniowych jak i popołudniowych, zapewniają lepszą przepustowość ronda. Dla każdego z badanych natężeń ruchu w godzinach porannych charakteryzował się najlepszą (dla 100% i 110%), bądź bardzo dobrą (dla 120%) efektywnością w obsłudze pojazdów na skrzyżowaniu. Dla godzin popołudniowych w każdym przypadku wypadł najlepiej.



Rys.3. Liczba pojazdów w sieci – godziny poranne, 100% natężenia



Rys.4. Liczba pojazdów w sieci – godziny popołudniowe, 120% natężenia



Rys.5. Długości kolejek na wlotach – godziny popołudniowe, 120% natężenia

6. WNIOSKI

Analiza wyników dowodzi, że stworzone programy sygnalizacji świetlnej charakteryzowały się bardzo dobrą efektywnością obsługi pojazdów oczekujących w kolejce, co z kolei rzutowało na lepszą przepustowość ronda. Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że kluczowe znaczenie dla efektywnego działania ronda ma odpowiedni dobór czasu trwania cyklu sygnalizacji świetlnej. Zbyt krótki prowadzi do niskiej przepustowości wlotu, natomiast zbyt długi może prowadzić do wzajemnego blokowania lewoskrętów. Kolejną istotną kwestią jest dobór czasu trwania poszczególnych sygnałów. Dłuższy sygnał zielony powinien być emitowany na wlocie (wlotach), na których jest większe niż na pozostałych natężenie ruchu. Odpowiednia synchronizacja tych sygnałów eliminuje istnienie sytuacji kolizyjnych na skrzyżowaniu (przede wszystkim samochód-samochód i samochód-tramwaj).

Podsumowując można stwierdzić, że właściwie zaprojektowanie sygnalizacji świetlnej może istotnie wpłynąć na poprawę przepustowości na skrzyżowaniu.

7. BIBLIOGRAFIA

- [1] Collette Y., Siarry P.: *Multiobjective Optimization: Principles and Case Studies*, Springer 2003.
- [2] Gazis D.C.: *Traffic Theory*, Springer 2002.
- [3] Polaszek P.: *Optymalizacja sygnalizacji świetlnej na złożonym skrzyżowaniu o ruchu okrężnym z uwzględnieniem różnych środków transportu*, praca magisterska, Poznań, Politechnika Poznańska 2010.
- [4] <http://www.ptvag.com/> (wrzesień, 2010).
- [5] Wiedemann R.: *Simulation des Straßenverkehrsflusses*. Schriftenreihe des IfV (Institut für Verkehrswesen, Universität Karlsruhe), 8, 1974.
- [6] Wiedemann R.: *Modelling of RTI-Elements on multi-lane roads*. W: Advanced Telematics in Road Transport, Commission of the European Community, DG XIII, Brussels, 1991.
- [7] VISSIM 5.20 User Manual (podręcznik użytkownika), 2009.