

Rafał DOROZ<sup>1</sup>  
Rafał WAŚNIK<sup>2</sup>  
Stanisław WIDUCH<sup>1</sup>

## WSKAŹNIKI JAKOŚCI STEROWANIA SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA W SYSTEMIE „OPTYMAL”

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono najczęściej stosowane wskaźniki umożliwiające ocenę jakości sterowania skrzyżowaniem ulic będącym jednym z krytycznych elementów sieci transportowej miasta, decydującym w dużym stopniu o jej przepustowości. Omówiono także nowy system komputerowego wyboru optymalnych harmonogramów sterowania sygnalizacją świetlną na skrzyżowaniu.

## THE QUALITY FACTORS IN THE „OPTYMAL” PACKAGE FOR ROAD TRAFFIC CONTROL

**Summary.** The paper several aspects of simulation facilities of the „OPTYMAL” package, developed in Institute of Transport. The quality factors of traffic control procedures have been discussed in the paper as well.

### 1. WPROWADZENIE

W ostatnich kilku latach obserwujemy w Polsce znaczny wzrost liczby pojazdów samochodowych, poruszających się po ulicach miast. Fakt ten, w połączeniu z ograniczeniami infrastrukturalnymi oraz brakiem środków finansowych, które nie pozwalają na szybką rozbudowę sieci komunikacyjnej, powoduje widoczne, ciągle pogarszanie się warunków ruchu pojazdów w sieci komunikacyjnej miasta.

<sup>1</sup> Mgr inż. Rafał Doroz, mgr inż. Stanisław Widuch, Uniwersytet Śląski, Instytut Informatyki

<sup>2</sup> Mgr inż. Rafał Waśnik, Politechnika Śląska, Instytut Transportu

Skrzyżowanie ulic jest elementem sieci ograniczającym płynność ruchu oraz przepustowość ciągów komunikacyjnych. Umiejętne sterowanie potokami pojazdów na skrzyżowaniach będących newralgicznymi punktami sieci transportowej jest jednym z istotnych czynników mogących znacznie poprawić przepustowość miejskich systemów komunikacyjnych.

Jeżeli na skrzyżowaniu zachodzi konieczność zastosowania sygnalizacji świetlnej, pojawia się problem wyboru rodzaju sygnalizacji oraz harmonogramu sterowania sygnalizatorami. Do oceny jakości ruchu (także jako pochodnej określonego sposobu sterowania ruchem) można stosować pewne wskaźniki których wartości odwzorowują stopień obciążenia i „wydolności” elementu sieci komunikacyjnej.

W dalszej części artykułu przedstawiono najczęściej stosowane wskaźniki jakości oceny ruchu oraz „Optymal” - system komputerowego doboru harmonogramu sterowania ruchem na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną, opracowany w Zespole Cyfrowych Systemów Sterowania, Instytutu Transportu, Politechniki Śląskiej.

## 2. WSKAŹNIKI JAKOŚCI STEROWANIA RUCHEM DLA SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLĄ

Istnieje wiele wskaźników umożliwiających ocenę jakości sterowania ruchem. W opracowaniu omówiono jedynie kilka ważniejszych, wykorzystanych w systemie „Optymal”. Jako argumenty funkcji jakości ruchu przyjmuje się: parametry ruchu, parametry sterowania oraz geometrię skrzyżowania. Parametry geometryczne są niezmiennicze – nie zależą od systemu sterowania. Można więc przedstawić problem jakości sterowania ruchem na skrzyżowaniu jako funkcję parametrów ruchu i sterowania przy określonych, stałych parametrach geometrycznych.

Do najczęściej stosowanych kryteriów jakości sterowania można zaliczyć:

- przepustowość,
- sprawność ruchu związaną z maksymalnym skracaniem długości czasu podróży i strat czasu pojazdów spowodowanych zatrzymaniami,
- ekonomikę ruchu – czyli dążenie do maksymalnego zmniejszania kosztów eksploatacji pojazdu i użytkownika systemu, a także czasu traconego przez użytkowników systemu transportowego,
- płynność ruchu wynikającą z częstotliwości zmian prędkości pojazdów,



- uciążliwość ruchu dla środowiska: poziom hałasu, ilość emitowanych spalin,
- bezpieczeństwo ruchu – wskaźnik wypadkowości.

### 2.1. Przepustowość skrzyżowania

Przepustowość – jest to największa liczba uczestników ruchu, która może przekroczyć określony przekrój drogi w jednostce czasu przy określonych warunkach ruchowo-drogowych i sygnalizacyjnych. Przepustowość skrzyżowania jest determinowana przez przepustowości poszczególnych pasów i wlotów, a ich przepustowości zależą ściśle od natężeń nasycenia i parametrów programu sygnalizacji. Warunki ruchowe charakteryzowane są m.in. przez natężenia ruchu pojazdów na wlotach oraz ich strukturę kierunkową i rodzajową, warunki drogowe przez geometrię skrzyżowania, a sygnalizacyjne przez układ i długości czasów trwania poszczególnych sygnałów zielonych.

Przepustowość grupy pasów lub wlotu jest określona wzorem [5]:

$$C_i = S_i \cdot \frac{G_{ej}}{T_c} \quad [E/h] \quad (2.1.1)$$

gdzie:  $i$  – numer wlotu lub grupy pasów,

$j$  – numer fazy sygnalizacji świetlnej,

$G_{ej}/T_c$  – udział efektywnego sygnału zielonego w cyklu,

$S_i$  – natężenie nasycenia.

Natężenie nasycenia  $S$  – to maksymalne natężenie potoku pojazdów mogących przejechać linię zatrzymań danego wlotu lub grupy pasów ruchu przy określonych warunkach ruchowych i drogowych podczas trwania efektywnego sygnału zielonego w przeliczeniu na jedną godzinę.

### 2.2. Stopień obciążenia wlotu

Stopień obciążenia  $X_{ij}$  to stosunek natężenia ruchu wyrażony w pojazdach umownych na godzinę  $N_{ij}$  [E/h] do przepustowości  $C_{ij}$  [E/h] dla poszczególnych relacji, wlotów lub pasów ruchu.

$$X_{ij} = \frac{N_{ij}}{C_{ij}} [1] \quad (2.2.1)$$

gdzie: i - numer wlotu,

j - pas ruchu

### 2.3. Straty czasu

Straty czasu to dodatkowy czas potrzebny na przejazd danego skrzyżowania w odniesieniu do czasu, który byłby zużyty, gdyby ruch nie był zakłócany (przerywany) na przykład działaniem sygnalizacji świetlnej.

Straty czasu na pojedynczym skrzyżowaniu występują ze względu na:

- czas zatrzymania (oczekiwania na sygnał zezwalający na ruch),
- czas opóźnienia – związany ze zmniejszaniem prędkości od tej występującej w strumieniu ruchu przed skrzyżowaniem do prędkości umożliwiającej bezpieczny przejazd przez skrzyżowanie lub aż do zatrzymania,
- czas przyspieszenia – czyli czas od chwili ruszenia pojazdu z miejsca do momentu osiągnięcia prędkości występującej na skrzyżowaniu.

Przy ocenie warunków ruchu stosuje się średnie sumaryczne straty czasu uwzględniające straty opóźnienia, zatrzymania i przyspieszenia wraz ze stratami czasu zatrzymania (oczekiwania pojazdu w kolejce).

W systemie „Optymal” do obliczania strat czasu wykorzystano wzór Webstera [1]:

$$d = \frac{T_c \cdot (1 - \lambda)^2}{2 \cdot (1 - \lambda \cdot X)} + \frac{X^2}{2 \cdot N \cdot (1 - X)} + 0,65 \cdot \left( \frac{T_c}{N^2} \right)^{\frac{1}{3}} \cdot X^{(2+5,2)} \quad (2.3.1)$$

gdzie: N - natężenie ruchu na pasie (wlocie) w pojazdach umownych na godzinę [E/h],

X - stopień obciążenia pasa ruchu (wlotu),

T<sub>c</sub> - długość cyklu w [s],

λ - udział efektywnego sygnału zielonego w cyklu.

Pierwszy składnik wzoru reprezentuje straty czasu przy równomiernym dopływie potoków ruchu, zaś dwa pozostałe – straty wynikające z losowych wahań natężeń ruchu.



## 2.4. Globalne straty czasu

Globalne straty czasu  $g_{sc}$  [(s/E)·(E/h)] na skrzyżowaniu to suma iloczynów strat czasu na poszczególnych wlotach  $d$  i odpowiadających im natężeń ruchu  $N$ :

$$G_{sc} = \sum_{i=1}^n d_i \cdot N_i \text{ [s/h]} \quad (2.4.1)$$

gdzie:  $i$  – numer wlotu (pasa) ruchu.

## 2.5. Długości kolejek na wlotach

Długość kolejek na wlotach to eksploatacyjna cecha skrzyżowania bezpośrednio odczuwana przez kierowców. Kolejki tworzone są przez pojazdy oczekujące na wjazd na skrzyżowanie, czyli pojazdy zatrzymane lub zmuszone do zmniejszenia prędkości jazdy.

W systemie „Optymal” długości kolejek wyrażane są poprzez ilość pojazdów oczekujących na wjazd na poszczególnych pasach ruchu. Określanie maksymalnej kolejki na wlocie odbywa się według następującego algorytmu:

Na podstawie natężeń ruchu na poszczególnych wlotach oraz założonej długości czasu trwania światła czerwonego dla danej fazy ruchu wyznaczane jest średnie natężenie ruchu pojazdów w tym okresie czasu:

$$msr = \frac{N \cdot R}{3600} \text{ [E/h]} \quad (2.5.1)$$

Korzystając z rozkładu Poissona obliczane jest prawdopodobieństwo dojazdu  $x$  pojazdów w czasie trwania sygnału czerwonego  $R$  przy średniej  $msr$  pojazdów [5]:

$$P(x, msr) = \frac{msr^x \cdot e^{-msr}}{x!} \text{ [/]} \quad (2.5.2)$$

Jako prawdopodobną liczbę pojazdów  $L_p$  zatrzymanych na czerwonym świetle należy przyjąć takie  $x$ , dla którego spełniona jest nierówność:

$$\sum_{x=0}^{L_p} P(x, msr) \geq 0,95 \quad (2.5.3)$$

### 3. SYSTEM „OPTYMAL”

System „Optymal” pozwala na wybór czasu trwania faz - sygnałów zielonych dla określonego układu faz na pojedynczym skrzyżowaniu w funkcji zmierzonych natężeń ruchu, geometrii skrzyżowania oraz wartości wag kryteriów optymalizacji. Ten ostatni czynnik szczególnie wyróżnia „Optymal” od innych dostępnych narzędzi optymalizujących programy sygnalizacji świetlnej. Istnieje tutaj bowiem możliwość dowolnego doboru proporcji pomiędzy sześcioma głównymi kryteriami optymalizacji:

- minimalnego stopnia obciążenia wlotu (pasa) ruchu,
- równych stopni obciążenia,
- minimalnych strat czasu,
- minimalnych globalnych strat czasu (dla całego skrzyżowania),
- równych strat czasu,
- ograniczenia długości kolejek na wlotach.

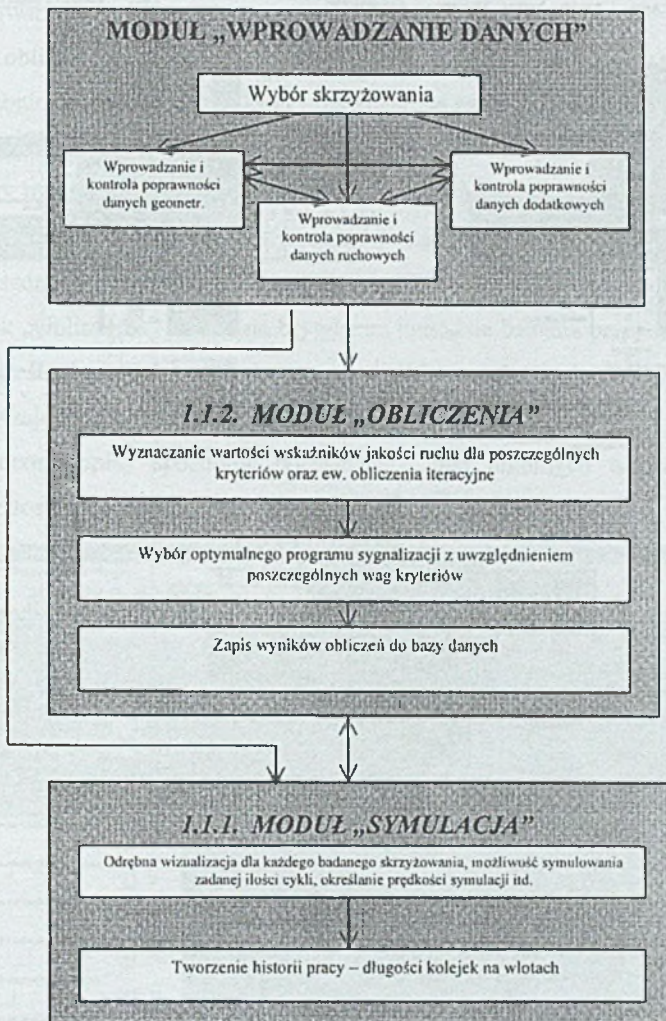
„Optymal” został zaimplementowany narzędziami programowymi Borland Delphi 4.0. Składa się on z trzech zasadniczych modułów programowych: wprowadzania danych, obliczeń oraz symulacji (rys. 1).

#### 3.1. Moduł „Wprowadzanie danych”

W tym segmencie programu wprowadzane są:

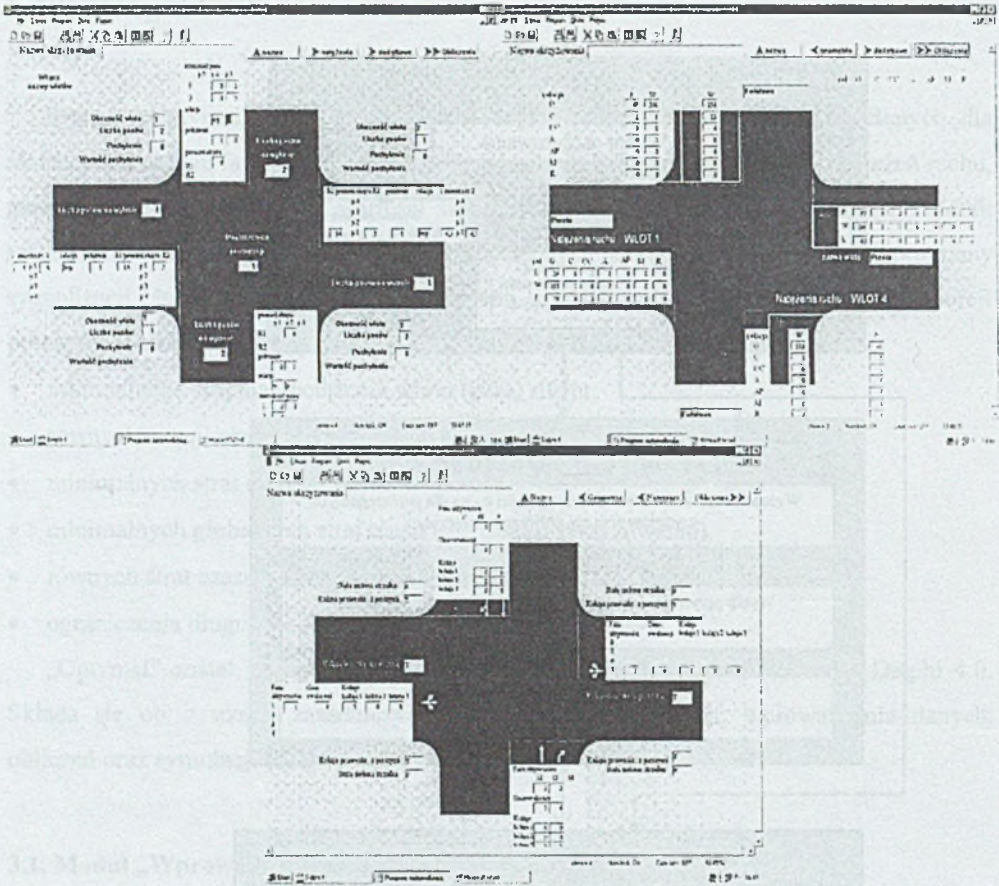
- geometria badanego skrzyżowania - układ pasów, ich rozmieszczenie, ilość itd.,
- natężenia ruchu na poszczególnych pasach ruchu (w praktycznym zastosowaniu systemu dane te aktualizowane są na bieżąco na podstawie stanów czujników – na przykład pętli indukcyjnych – zainstalowanych na skrzyżowaniu),
- dodatkowe dane opisujące: kolejność faz ruchu na skrzyżowaniu, czasy ewakuacji, wzajemną kolizyjność pasów ruchu, maksymalne dopuszczalne kolejki na wlotach oraz inne.





Rys. 1. Moduły systemu „Optymal”

Fig. 1. Modules of „Optymal” system



Rys. 2. Widoki ekranów modułu „Wprowadzanie danych”  
 Fig. 2. Screens of the module „Wprowadzanie danych”

### 3.2. Moduł „Obliczenia”

W module tym następuje określenie (na podstawie obliczonych wartości wskaźników jakości ruchu) długości czasu trwania sygnałów zielonych zezwalających na ruch pojazdów w poszczególnych fazach.

Przy konstruowaniu programu komputerowego kierowano się zasadą jego maksymalnej uniwersalności. Stąd nie określono z góry rodzaju skrzyżowania (3 lub 4 wlotowe), rozmieszczenia pasów na wlotach oraz innych parametrów geometrycznych, które definiuje sam użytkownik. Maksymalną liczbę pasów występujących na skrzyżowaniu ograniczono do



14 co pozwala na badanie skrzyżowań dróg z czterema i trzema pasami ruchu na wlotach skrzyżowania.

W obliczeniach przyjęto zasadę traktowania każdego pasa ruchu z osobna jako wyodrębnionej jednostki, dla której określane są parametry ruchu, co wiąże się z pewnymi wymaganiami dotyczącymi sposobu gromadzenia danych ruchowych; natężenia ruchu powinny być bowiem określane dla każdego pasa ruchu z osobna, a nie tylko dla wlotu jako całości. Pozwala to jednak na zwiększenie dokładności obliczeń, a co za tym idzie, uzyskiwania dokładniejszych wyników.

Blok „Obliczenia” bazuje na brytyjskiej metodzie badania przepustowości TRRL [3]. W celu określenia natężeń nasycenia pasów ruchu z relacjami LW/LW, które są względem siebie wzajemnie kolizyjne, stosuje się obliczenia iteracyjne [4].

Skrócone opisy sposobów wyznaczania poszczególnych wskaźników jakości ruchu opisane zostały w punkcie 2 niniejszego artykułu.

Skryzowanie - Obliczenia Przykladowe dane skryzowania DB

Edycja Program Data Pomoc

Natężenie skrzyżowania: Prosta - Kształowa

Liczba faz sygnalizacji świetlnej: 2  
 Liczba pasów ruchu w kierunku: 2  
 Liczba pasów ruchu w przeciwnym kierunku: 2

Geometria Natężenia Dodatkowe dane Przelicz Wyniki

Wykresy: Wykres natężenia skrzyżowania: 50  
 Wykres natężenia skrzyżowania: 8  
 Wykres natężenia skrzyżowania: 50  
 Wykres natężenia skrzyżowania: 25  
 Wykres natężenia skrzyżowania: 12  
 Wykres natężenia skrzyżowania: 50

Wybór parametrów: Wykres natężenia skrzyżowania: 90  
 Data: 01/01/2010 12:00

Optymalne długości pasów dla powiązanych kierunków					Dł. pasa	
G1	G2	G3	G4	G5		
55	46				120	Maks. pojemn. obr. pasa: 0.884
61	42				120	Odczyn standard. sk. obr.: 0.1907
22	21				90	Maksymalne sk. sk. czasu: 18.920
27	20				90	Maks. pojemn. sk. sk. czasu: 117.915
25	10				60	Odczyn standard. sk. czasu: 4.54
32	35				104	

Sk. czasu w obr. 17 Liczba kierunków obr. dla pasów w kierunku LWLW1: 4

WYNIKOWY PROGRAM SYGNALIZACJI		
22	20	50
		Maks. stopień obsadzenia: 0.775

okno = 3 film lock ON Capt lock OFF 10:45:05

Start Długość 4 Program optymalizacja...

Rys. 3. Widok ekranu z modułu „Obliczenia”

Fig. 3. Screen of the module „Obliczenia”



Obliczenia wykonuje się dla wszystkich dopuszczalnych (po uwzględnieniu ograniczeń formalnych [2]) kombinacji czasów trwania poszczególnych sygnałów świateł zielonych z dokładnością do 1 [s]. Podczas procesu obliczeniowego wybierane są najlepsze programy sygnalizacji świetlnej dla poszczególnych kryteriów optymalizacji, a następnie na podstawie określonych przez użytkownika systemu wartości wag poszczególnych kryteriów następuje wyznaczenie jednego „zbiorowo” najlepszego harmonogramu sterowania ruchem (rys. 3).

Ciekawe możliwości daje funkcja ograniczenia zbioru dopuszczalnych programów sygnalizacji. Poprzez odrzucenie programów nie spełniających warunku maksymalnego dopuszczalnego (określonego przez użytkownika) obciążenia pasa ruchu eliminujemy ewentualne programy optymalne dla wszystkich kryteriów jednocześnie, ale niedopuszczalne do zastosowania jako nie gwarantujące rozładowywania kolejek na wlotach skrzyżowania oraz zapewniamy wybór programu zapewniającego nie gorszy od założonego stopień obciążenia pasów ruchu występujący dla badanego skrzyżowania.

Ograniczenia dotyczące długości trwania cyklu (także narzucane przez użytkownika) pozwalają na zastosowanie systemu „Optymal” do sprawdzania dopuszczalności stosowania wybranego harmonogramu bez rozpatrywania i analizowania innych programów sygnalizacji.

„Optymal” może być użyty do wyboru programu stałoczasowej sygnalizacji świetlnej, a zastosowanie ciągłego, cyklicznego trybu obliczeń da w efekcie (przy odpowiednim sprzężeniu systemu ze sterownikiem sygnalizacji świetlnej) pracę sterownika w trybie sygnalizacji akomodacyjnej.

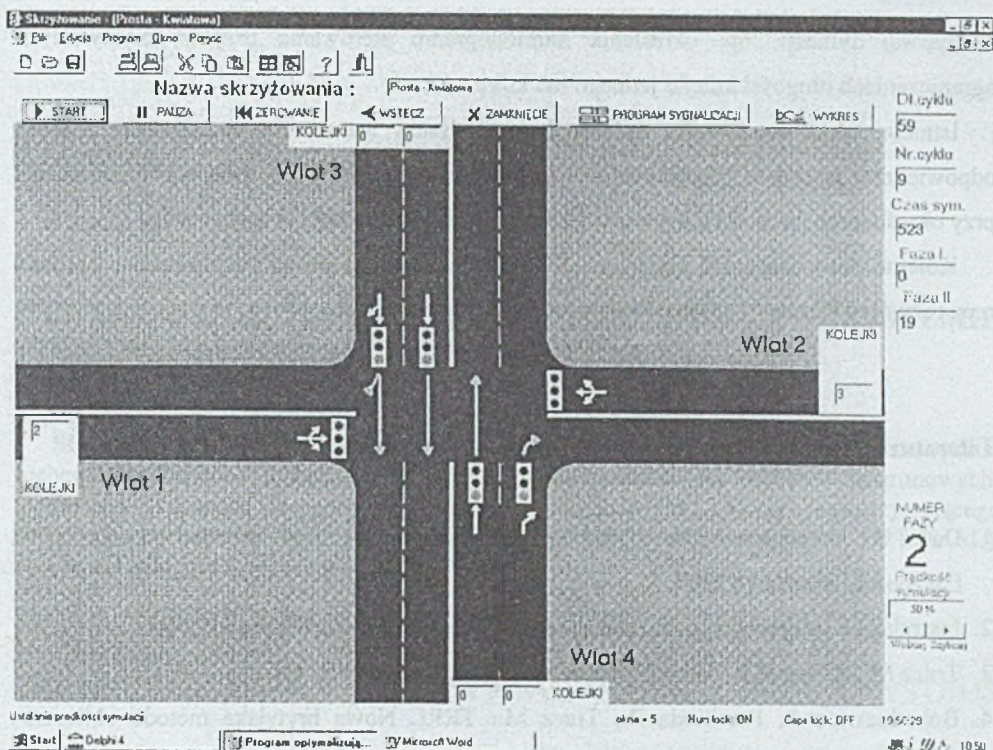
Konstrukcja programu umożliwia także tworzenie grup skrzyżowań np. dla określonego obszaru miasta i umieszczania ich w osobnych bazach danych. Dla takich grup zawierających pewną liczbę skrzyżowań traktowanych jako odosobnione ale jednak ze sobą korelujące, mogą być automatycznie wykonywane obliczenia i generowane programy sygnalizacji.

### 3.3. Moduł „Symulacja”

W tej części systemu przeprowadzana jest symulacja efektów działania programu sygnalizacji będącego wynikiem działania modułu „Obliczenia”.

Badane skrzyżowanie prezentowane jest graficznie w osobnym oknie (rys. 4).





Rys. 4. Widok ekranu z modułu „Symulacja”

Fig. 4. Screen of the module „Symulacja”

Możliwe jest wykonywanie symulacji w czasie rzeczywistym lub ze zwielokrotnioną prędkością oraz obserwacja (tworzonej w postaci wykresów) historii kolejek tworzących się na wlotach skrzyżowania.

#### 4. PODSUMOWANIE

System „Optymal” może być pomocnym narzędziem wspomagającym projektowanie programów sygnalizacji świetlnej w celu określania ich optymalnych wartości czasów trwania sygnałów zielonych zarówno dla sygnalizacji stałoczasowej, jak i akomodacyjnej.

Ze względu na możliwość praktycznie dowolnego doboru proporcji lub wykluczenia z obliczeń określonych kryteriów wyboru programu sygnalizacji „Optymal” pozwala projektantowi sygnalizacji na uzyskanie rozwiązania najlepszego dla konkretnej, zwłaszcza

nietyposwej sytuacji, np. określenia harmonogramu sterowania przy rygorystycznych ograniczeniach długości kolejki jednego lub kilku wlotów.

Istnieje także możliwość wyboru harmonogramu sterowania o zadanyu z góry odpowiednim poziomie jakości ruchu – o ile założony poziom jest możliwy do uzyskania przy określonych parametrach geometryczno – ruchowych danego skrzyżowania.

Kolejne etapy pracy nad systemem „Optymal” będą miały na celu usprawnienie obliczeń oraz rozwój, o elementy animacji ruchu, opcji „Symulacja”.

## Literatura

1. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1997.
2. Instrukcja o drogowej sygnalizacji świetlnej. Monitor Polski, Warszawa 1994.
3. Tracz M., Allsop R.E.: Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną.
4. Bohatkiewicz J., Przebinda B., Tracz M.: TRRL Nowa brytyjska metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Transport Miejski nr 5/89.
5. Tracz M. , Tarko A. ,Chodur J.: Przepustowość skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 1992.

Recenzent: Prof. dr hab. inż Jan Piecha

## Abstract

The „Optymal” package is expected to be may be a helpful tool in designing process of the traffic control systems. The optimisation procedures of the package allow the developer to apply the constant-time or accommodating-time schedule of road traffic signals control.

The package allows the user selecting a proper set of quality factors that define the most adequate traffic-flow. The speculation with the traffic optimisation factors allows choosing a proper time schedule for any crossroad combination. Road junction geometric parameters as well as queuing parameters describe starting conditions for the traffic control procedure.