ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 47 Nr kol. 1586

Grzegorz SIERPIŃSKI [1]

MODEL WEBSTERA – SYMULACJA KOMPUTEROWA

Streszczenie. W artykule zawarto omówienie modelu Webstera oraz przedstawiono program komputerowy „WMSim" wyznaczający optymalny cykl sygnalizacji i średnie opóźnienie na wlocie na pojazd. Symulator pomoże dostosować model Webstera do warunków panujących na polskich drogach.

WEBSTER'S MODEL – COMPUTER SIMULATION

Summary. This article includes a review of the Webster's model and presents a computer program called WMSim. The program is used for calculating the optimal cycle of a traffic signalling and an average delay on inlets per vehicle. The simulator will help to adjust the Webster's model to the Polish roads conditions.

1. WPROWADZENIE

Węzły drogowe stanowią wąskie gardła sieci transportowej, dlatego ciągle poszukuje się rozwiązań zwiększających płynność ruchu na skrzyżowaniach. Aby tego dokonać, wprowadzono systemy sterowania ruchem w postaci sygnalizacji świetlnej. Zastosowanie sygnalizacji świetlnej powoduje zmniejszenie lub nawet eliminację punktów kolizji w węźle. Kolejnym problemem jest odpowiedni dobór długości sygnałów zielonych. Jednym z prekursorów poszukiwania optymalnego czasu trwania cyklu sygnalizacji jest Francis Vernon Webster (1958). Opracował on również wzór pozwalający obliczyć średnie opóźnienie na wlocie na pojazd. Od tamtego czasu powstało wiele metod obliczeniowych, jednak większość z istniejących metod zawiera elementy metody brytyjskiej RRL oraz modelu Webstera [1].

2. OPTYMALNY CYKL SYGNALIZACJI

Uzyskanie optymalnego cyklu sygnalizacji pozwala na:
- minimalizację średnich strat czasu na wlotach,
- minimalizację liczby zatrzymań i startów w węźle,
- zwiększenie (polepszenie) płynności ruchu w węźle,
- zmniejszenie emisji spalin oraz zmniejszenie hałasu w otoczeniu węzła.

[1] Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, grzesier@polsl.katowice.pl

Istnieje wiele metod rozdziału sygnału zielonego pomiędzy poszczególne fazy [2]:
- proporcjonalnie do wartości stopni nasycenia,
- przez minimalizację strat czasu,
- poprzez analizę prawdopodobieństwa obsługi pojazdów w okresie sygnału zielonego,
- poprzez uwzględnienie długości kolejek pojazdów na wlotach krytycznych.

Model Webstera analizuje skrzyżowanie czterowlotowe. Wloty oznaczono odpowiednio: N-północ, S-południe, E-wschód, W-zachód. Do wyznaczenia cyklu sygnalizacji przy pomocy algorytmu Webstera potrzebne są następujące dane:
- natężenia q na poszczególnych wlotach [P/h];
- natężenia nasycenia S na poszczególnych wlotach [P/hz];
- opóźnienie startu t_{os} [s];
- czas ewakuacji t_e [s].

Postępowanie obliczeniowe jest następujące:

1) Wyznaczenie proporcji ruchu dla poszczególnych faz:

$$y_{N-S} = \max(\frac{q_N}{S_N}, \frac{q_S}{S_S}), \quad y_{E-W} = \max(\frac{q_E}{S_E}, \frac{q_W}{S_W}) \tag{1}$$

2) Wyznaczenie całkowitego czasu traconego na cykl:

$$L = n \cdot t_{os} + R = n \cdot t_{os} + n \cdot t_e = n \cdot (t_{os} + t_e) \tag{2}$$

gdzie:

n – liczba faz;

t_{os} – opóźnienie startu dla danej fazy;

t_e – czas ewakuacji;

R – jest to czas w cyklu, w którym na wszystkich sygnalizatorach jest wyświetlany sygnał czerwony.

Webster zakładał jednakowe opóźnienie startu oraz czasy ewakuacji dla wszystkich relacji.

3) Wyznaczenie optymalnej długości cyklu sygnalizacji:

$$C_{opt} = \frac{1{,}5 \cdot L + 5}{1 - \sum_{i=1}^{n} y_i} \tag{3}$$

4) Wyznaczenie łącznego efektywnego czasu zielonego:

$$\sum_{i=1}^{n} g_i = C_{opt} - L \tag{4}$$

Efektywny czas zielony dla poszczególnych faz jest wyznaczany z proporcji:

$$g_1 : g_2 : \ldots : g_n = y_1 : y_2 : \ldots : y_n$$

$$g_i = \frac{y_i}{Y} \cdot \sum_{i=1}^{n} g_i \tag{5}$$

5) Wyznaczenie rzeczywistych czasów zielonych dla poszczególnych faz:

$$G_i = g_i + t_{os} - A \tag{6}$$

gdzie:

G_i – czas zielony dla danej fazy; g_i – efektywny czas zielony dla danej fazy;
t_{os} – opóźnienie startu; A – czas żółty (zwykle 3 [s]).

3. ŚREDNIE OPÓŹNIENIE (STRATY CZASU)

Średnie opóźnienie na pojazd należy rozumieć jako różnicę pomiędzy średnim czasem przejazdu przez skrzyżowanie z zatrzymaniem a płynnym czasem przejazdu (tzn. bez zatrzymania).

Trudność w stworzeniu wyrażenia możliwie dokładnie opisującego opóźnienia powstające na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną polega przede wszystkim na konieczności stworzenia wzoru możliwie prostego, a jednocześnie uniwersalnego dla rozmaitych warunków światowych. Webster jako jeden z pierwszych stworzył formułę pozwalającą obliczyć średnie opóźnienie. Wzór powstał przez połączenie metod teoretycznych oraz symulacji komputerowych. Jest on następujący:

$$d = \frac{c \cdot (1-\lambda)^2}{2 \cdot (1-\lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot q \cdot (1-x)} - 0{,}65 \cdot \left(\frac{c}{q^2}\right)^{\frac{1}{3}} \cdot x^{(2+5 \cdot \lambda)} \tag{7}$$

gdzie:

d – średnie opóźnienie na pojazd [s];
c – długość cyklu sygnalizacji [s];
$\lambda = g/c$ – udział sygnału efektywnego zielonego w cyklu;
g – efektywny czas zielony [s]
q – natężenie [P/h]
$x = q/(\lambda S)$ – stopień nasycenia;
S – natężenie nasycenia [P/hz].

Pierwszy składnik wzoru (7) reprezentuje opóźnienie dla potoku równomiernego (równomierne przybycia – stałe natężenie). Drugi składnik stanowi „dodatek" z uwagi na losową naturę przybyć (losowe wahania ruchu). Jest to tzw. „losowe opóźnienie" uwzględniające rozkład Poissona zgłoszeń pojazdów oraz stałą przepustowość. Trzeci składnik bazuje na wynikach symulacji. Jest to składnik korygujący, zwykle stanowiący około 10% całego opóźnienia [3].

Rozkład Poissona zgłoszeń pojazdów można opisać za pomocą odstępów między pojazdami, generowanych według przesuniętego wykładniczego rozkładu prawdopodobieństwa [4]:

$$P(h \geq t) = e^{-(t-t_0)/(\bar{t}-t_0)} \tag{8}$$

gdzie:

$\bar{t}$ - średni odstęp czasu między pojazdami;
t_0 - minimalny odstęp czasu między pojazdami na jednym pasie.

Z uwagi na złożoność wzoru (7) zwykle stosuje się wzór aproksymacyjny:

$$d = 0{,}9 \cdot \left[\frac{c \cdot (1-\lambda)^2}{2 \cdot (1-\lambda \cdot x)} + \frac{x^2}{2 \cdot q \cdot (1-x)} \right] \tag{9}$$

4. KOMPUTEROWE WSPOMAGANIE WYZNACZANIA CYKLU SYGNALIZACJI

Program „WMSim" został napisany w środowisku Delphi. Jego działanie zakłada „dialog" z użytkownikiem poprzez kolejno wyświetlane okna, w których następuje m.in.:

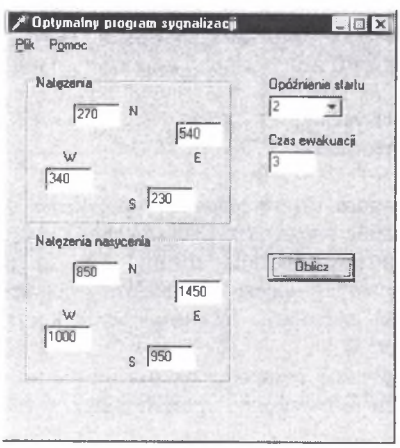
- wprowadzanie danych;
- wyznaczenie optymalnego programu sygnalizacji oraz średniego opóźnienia pojazdów;
- gereracja odstępów dla poszczególnych wlotów;
- wizualizacja symulacji skrzyżowania z sygnalizacją świetlną wraz z wyznaczaniem chwilowego i średniego opóźnienia dla poszczególnych wlotów.

„WMSim" umożliwia wyznaczenie cyklu dla sygnalizacji dwufazowej stałoczasowej oraz wyznaczenie średniego opóźnienia na pojazd dla danego wlotu. Zawarto w nim algorytm obliczeń zgodny z algorytmem stosowanym przez Webstera.

Dane wejściowe to:

- natężenia q na poszczególnych wlotach [P/h];
- natężenia nasycenia S na poszczególnych wlotach [P/hz];
- opóźnienie startu t_{os} [s];
- czas ewakuacji t_e [s] (wspólny dla całego skrzyżowania, tak jak przyjmował Webster).

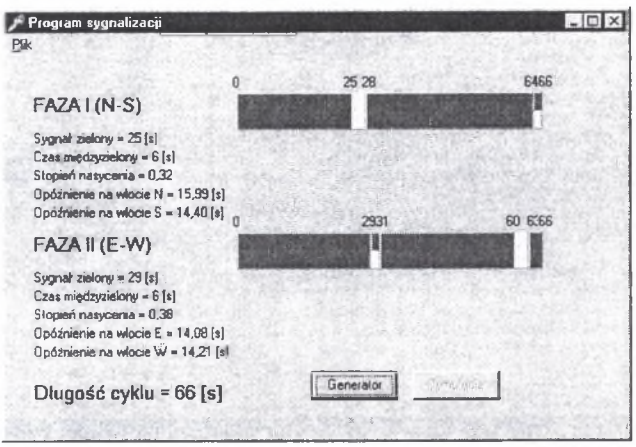
Dane można wprowadzić za pomocą klawiatury oraz z odpowiednio przygotowanego pliku tekstowego. Okno wprowadzania danych przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Okno wprowadzania danych
Fig. 1. Data input window

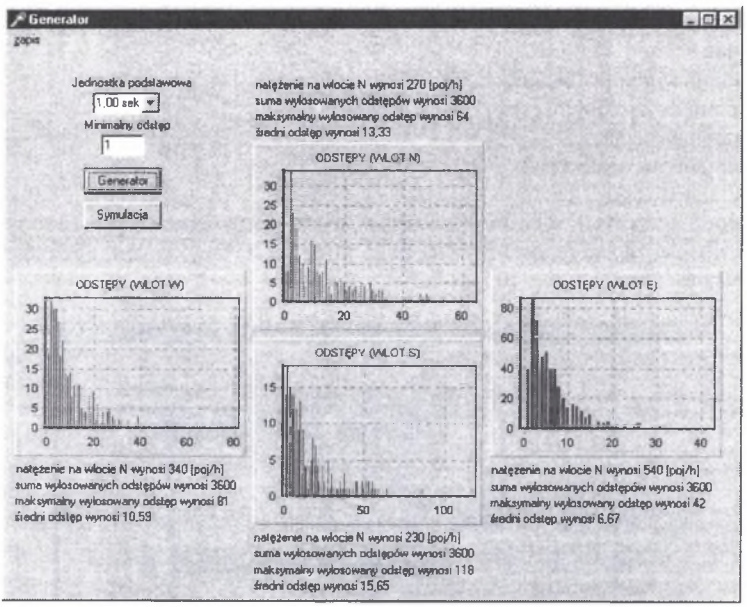
Po naciśnięciu przycisku 'Oblicz' pojawia się okno z wielkościami wyjściowymi (rys. 2), to jest:
- długościami sygnałów zielonych [s];
- czasami międzyzielonymi [s]
- stopniami nasycenia;
- opóźnieniami na wlotach [s];
- długością cyklu [s].

Oprócz prezentacji opisowej wyników wyrysowany zostaje program sygnalizacji. Istnieje możliwość zapisu raportu z obliczeń do pliku tekstowego w celu późniejszych analiz porównawczych.

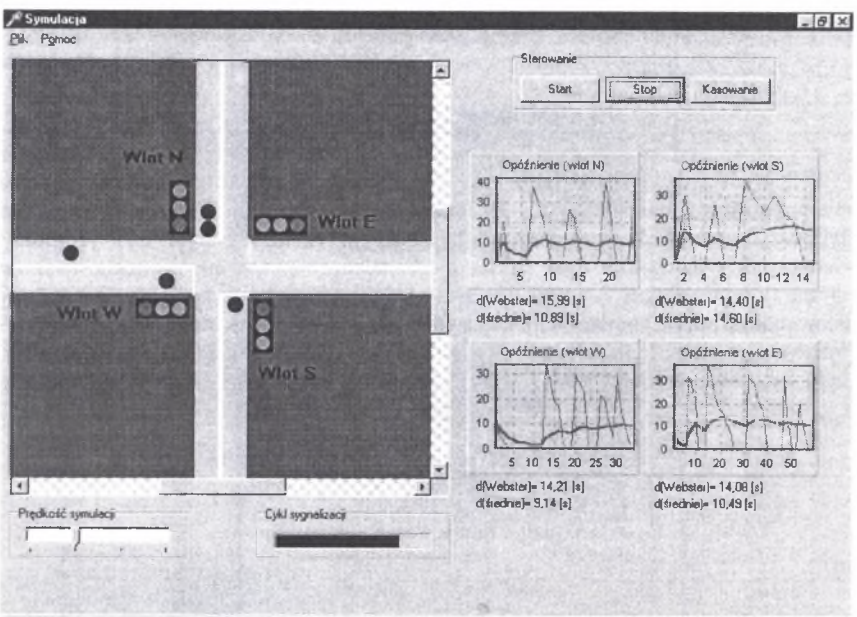


Rys. 2. Program sygnalizacji
Fig. 2. Signalling program

Kolejnym zadaniem programu jest wygenerowanie potoków pojazdów na wlotach. Zaimplementowany generator (rys. 3) losuje odstępy między pojazdami o rozkładzie przesuniętym wykładniczym oddzielnie dla każdego wlotu. Ponadto istnieje możliwość ustawienia jednostki podstawowej (1, ½, ¼ sekundy) oraz przesunięcia (nazwanego w programie minimalnym odstępem). Dla każdego wlotu rysowany jest histogram przedstawiający liczbę powtórzeń każdego wylosowanego odstępu. Dodatkowe dane otrzymane po generacji to maksymalny i średni odstęp między pojazdami. Istnieje możliwość podglądu wylosowanych odstępów.



Rys. 3. Generator odstępów między pojazdami
Fig. 3. Gaps generator



Rys. 4. Okno symulacji
Fig. 4. Simulation window

Po wygenerowaniu odstępów można przejść do symulacji skrzyżowania z sygnalizacją świetlną (rys. 4). Dla lepszej czytelności postępu symulacji stworzono wizualizację ruchu na badanym skrzyżowaniu. Sekwencja sygnałów wyświetlana na skrzyżowaniu jest zgodna z obliczoną wcześniej według algorytmu Webstera. Wygenerowane pojazdy „zgłaszają się" w odpowiednio dobranej odległości od skrzyżowania, tak aby ich ruch nie był zakłócany przez tworzące się na wlotach kolejki pojazdów. Symulacja może się odbywać w czasie rzeczywistym, a także istnieje możliwość ustawienia prędkości symulacji na 2, 4, lub 10 razy szybszą; czyli wyniki z symulacji 60-minutowej można otrzymać w ciągu 6 minut. Jest to pomocne szczególnie w przypadku potrzeby porównania kilku rozwiązań. W trakcie symulacji rejestrowane są straty czasu pojazdów. Na bieżąco tworzone są charakterystyki chwilowego opóźnienia dla danego pojazdu na danym wlocie. Średnie opóźnienie na wlocie jest porównywalne z wartością wyznaczoną ze wzoru Webstera (9).

5. PODSUMOWANIE

Mimo dużego rozwoju techniki oraz zaawansowanych globalnych systemów sterowania zastosowanie sygnalizacji stałoczasowej jest nadal popularne. Użycie cyklu sygnalizacji wyznaczonego z algorytmu Webstera, po odpowiednich poprawkach do warunków panujących na polskich drogach, jest dobrym rozwiązaniem. Zaprezentowany program w przyszłości będzie rozbudowany o moduły analizy porównawczej kilku rozwiązań oraz możliwość wprowadzania poprawek w programie sygnalizacji. Ponadto pomoże w wyznaczeniu wskaźnika zmienności odstępów obsługi pojazdów na skrzyżowaniach z sygnalizacją stałoczasową.

Literatura

1. Tracz M., Allsop R. E.: Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. WKiŁ, Warszawa 1990.
2. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKiŁ, Warszawa 1999.
3. Webster F. V.: Traffic signal settings. Road Research Paper No. 39, Her Majesty's Stationary Office, London 1958.
4. Praca zbiorowa pod red. Krystek R.: Symulacja ruchu potoku pojazdów. WKiŁ, Warszawa 1980.
5. Woch J.: Teoria potoków ruchu (w druku).
6. Traffic Guidance Systems 2002-2003. Telecommunications & Traffic-Control Systems, http://wwwtvs.et.tudelft.nl/P&N/education/et4-024/Sheets/
7. Gartner N., Messer C. J., Rathi A. K.: Traffic Flow Theory A State-of-the-Art Raport. Transportation Research Board, http://wwwcta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html.

Abstract

In spite of a huge development of techniques and advanced global control systems, applying the fixed-time signalling is still popular. The use of a signalling cycle determined by the Webster's algorithm is a good solution after applying required corrections due to the Polish roads conditions.

The WMSim is a computer program used for calculating the optimal cycle of a traffic signalling and an average delay on inlets per vehicle. The program contains of a computational algorithm compatible with the algorithm proposed by Francis Vernon Webster (1958). The simulator will help to implement the Webster's model to the Polish roads conditions. In future the program will be fulfilled by modules of the comparative analysis and the possibility of making corrections in a signalling program. What is more, that will help in calculation of a variability index gaps services of vehicles on the intersections that are being controlled by fixed-time signalling.