OPTIMIZATION AND RELIABILITY OF INTELLIGENT TRAFFIC LIGHTS CONTROL SYSTEMS

OPTYMALIZACJA I NIEZAWODNOŚĆ INTELIGENTNYCH SYSTEMÓW STEROWANIA RUCHEM DROGOWYM

Katarzyna Topolska, Mariusz Topolski

International University of Logistics and Transport in Wrocław

e-mail: katarzyna.topolska@pwr.wroc.pl

Abstract: *The article presents problems of optimization and reliability to control the movement of vehicles within the intersections using classical methods and genetic algorithms with fuzzy evaluation of the chromosome. The authors doing research indicated that the genetic operators allow controlling traffic lights about 40% more efficient than by the classical method. Classical methods are defined as models based only on motion sensors and on the basis of FIFO. The proposed model of reliability of intelligent traffic lights control system is based on the time of operation, traffic density and average speed of vehicles traveling on a given stretch.*

Keywords: *reliability, optimization, control*

Streszczenie: *Artykuł prezentuje problematykę optymalizacji i niezawodności sterowania ruchem pojazdów w obrębie skrzyżowań z zastosowaniem metod klasycznych i algorytmów genetycznych z rozmytą oceną wartości chromosomu. Autorzy wykonując badania wskazali, że operatory genetyczne pozwalają o około 40% sprawniej sterować sygnalizacją świetlną niż metodą klasyczną. Metody klasyczne zostały zdefiniowane jako modele bazujące tylko na czujnikach ruchu i na zasadzie kolejki fifo. Zaproponowana model niezawodności inteligentnego systemu sterowania sygnalizacją świetlną bazując na czasie działania systemu, gęstości ruchu pojazdów oraz średniej prędkości pojazdów poruszających się na danym odcinku.*

Słowa kluczowe: *niezawodność, optymalizacja, sterowanie*

1. Wstęp

We współczesnej gospodarce mamy do czynienia z nieustającym wzrostem postępu technicznego. To on sprawia, że coraz więcej osób przemieszcza się po drogach min. pojazdami samochodowymi. To z kolei powoduje, iż narastają problemy ze sprawnym i płynnym przemieszczaniem się owych pojazdów po drogach w aglomeracjach miejskich [3]. Aby zwiększyć przepustowość ruchu na drogach powstają obwodnice miast. W mniejszym natomiast stopniu stawiany jest nacisk na zmianę organizacji sygnalizacji świetlnej uznając, że jest to problem NP-zupełny. Coraz częściej pojawiają się systemy sterujące ruchem drogowym poprzez czujniki ruchu umieszczone w obszarze sygnalizacji świetlnej. Istnieją systemy regulujące ruch w obrębie wielu skrzyżowań. Jednakże są one oparte na regułach decyzyjnych. Reguły owe zakładają stałą zależność czasową między cyklami świetlnymi występującymi w obrębie kilku skrzyżowań. Systemy te jednak znajdują zastosowanie w prostych problemach sterowania sygnalizacją świetlną, które opisują tylko proste odcinki dróg, a nie złożoną infrastrukturę skrzyżowań. W toku przeprowadzonych badań stworzono inteligentny system sterowania sygnalizacją świetlną w obrębie złożonych powiązań między skrzyżowaniami, który bazuje na algorytmach genetycznych oraz zbiorach rozmytych. Przeprowadzone wcześniej badania symulacyjne w obrębie miasta Wrocławia na odcinku Psie-Pole → Krzywoustego → Kochanowskiego → Plac Grunwaldzki → Trasa WZ → Legnicka → Lotnicza → Pilczycka, wykazały, iż wykorzystanie autorskiego rozwiązania o około 40% zwiększa przepustowość ruchu w okresie największego ruchu. Kolejnym elementem badań, których wyniki przedstawia niniejszy artykuł jest niezawodność omawianych systemów. Dzięki dobrze określonemu modelowi niezawodności możliwa będzie wstępna a priori analiza użyteczności wprowadzonych rozwiązań.

2. Model optymalizacyjny zarządzania sygnalizacją świetlną

W pierwszej kolejności zdefiniujemy model optymalizacji poprzez zmniejszenie ruchu pojazdów z wykorzystaniem autorskiej metody opartej na fuzji algorytmów genetycznych ze zbiorami rozmytymi.

Korzystając z oznaczeń definiujemy formalnie poprawność chromosomu dla k - pojazdów:

$$\forall_{i,j,k} (K_{Gijk} != 1) \quad (1)$$

Oznaczenia:

- i jest numerem grupy
- j, k są indeksami elementów w danej grupie (k różne od j)

Niech na i -tym pasie będzie w danej chwili a_i samochodów (może być to też współczynnik natężenia ruchu na danym pasie, oczywiście odpowiednio przeskalowany). Wtedy funkcja oceny chromosomu C wygląda następująco:

$$E(C) = \frac{\sum_{k=1}^n \min(R_{k,o}) - 0,1 * |R_{k,o}|}{\sum_{k=1}^d t_{k,o}} \quad (2)$$

i

$$R_{k,o} = P_{k,o} \cdot V \cdot t_{k,o} - \sum_{i \in G_{k,o}} a_{k,i,o} \quad (3)$$

Gdzie:

V - współczynnik szybkości pojazdów,

P_k - będzie mocą zbioru G_k (liczbą elementów danej grupy podążającej w tym samym kierunku i zwrocie na skrzyżowaniu).

t_k - jest czasem palenia się światła zielonego dla danej grupy k pojazdów

n - liczba grup

d - liczba wszystkich pojazdów na skrzyżowaniu

a_i - współczynnik występowania danej grupy pojazdów.

$$a_i = \begin{cases} 1 & \text{dla } G_k > 0 \\ 0 & \text{dla } G_k = 0 \end{cases} \quad (4)$$

Jeżeli przyjmiemy model analizujący ruch w obrębie kilku skrzyżowań z uwzględnieniem interakcji między wieloma W skrzyżowaniami będzie opisany za pomocą równania oceny poprawności chromosomu.

Dla analizy wielu skrzyżowań otrzymujemy ostatecznie równanie:

$$\forall W \quad E_W(C) = \sum_{o=1}^W \frac{\sum_{k=1}^n \min(R_{k,o}) - 0,1 * |R_{k,o}|}{\sum_{k=1}^d t_{k,o}}, \quad (5)$$

W wyniku wszelkich analiz wybierany jest taki cykl, który generuje największą ciągłość ruchu maksymalizując wartość funkcji oceny chromosomu zgodnie ze wzorem:

$$E(C) = \max \left\{ \sum_{o=1}^W \frac{\sum_{k=1}^n \min(R_{k,o}) - 0,1 * |R_{k,o}|}{\sum_{k=1}^d t_{k,o}} \right\} \quad (6)$$

We wzorze 6 możemy zauważyć, że ocena najlepszego chromosomu jest realizowana przez zmodyfikowaną funkcję wiarygodności i funkcję wyostrzania środka ciężkości wywodzącą się z teorii logiki rozmytej. W ten sposób wyznaczamy najlepszy z cykli wielu skrzyżowań pozwalający przy danych parametrach uzyskać najlepszy płynny ruch pojazdów w ich obrębie.

Należy nadmienić, że w przypadku łączenia zależnych skrzyżowań mamy przykład systemu sekwencyjnego, który może być opisana z dużym powodzeniem modelem łączącym logikę rozmytą z teorią ewidencji matematycznej [2].

Równanie dane wzorem (3) możemy teraz rozmyć zbiorami rozmytymi [2], otrzymując rozmytą wartość oceny chromosomu:

$$E_k(C) = \sup_{R_{k,o}} \{ \mu(R_{k,o}) \} \cdot \max_{1 \leq k \leq M} \mu(R_{k,o}) \quad (7)$$

Ostatecznie wybieramy ten cykl który maksymalizuje wartość oceny chromosomu z wykorzystaniem reguły kombinacji wywodzącej się z teorii ewidencji matematycznej [2] można przedstawić następująco:

$$E(C) = \max[E_1(C) \oplus E_2(C) \oplus \dots \oplus E_k(C)] \quad (8)$$

Implementacja funkcji wiarygodności chromosomu danej równaniem (6) lub (8) zależy od typu skrzyżowań. Nie ma jednak jasnych przesłanek pozwalający na ich logiczny wybór. Należy tutaj przyjąć metodę wdrożenia dwóch metod bądź symulacyjnego przetestowania owych rozwiązań w celu wyboru lepszego z nich.

3. Model niezawodnościowy inteligentnych systemów sterowania sygnalizacją świetlną.

W celu matematycznego opisu niezawodności rozważmy rozkład Weibulla $W(\alpha; \delta)$ [1] o gęstości (9):

$$p(u; \alpha, \delta) = \frac{\alpha u^{\alpha-1}}{\delta^\alpha} \exp\left(-\left(u / \delta\right)^\alpha\right), \quad u > 0; \quad (9)$$

Oznaczmy przez $Q = (Q_1, \dots, Q_n)$, próbkę z tego rozkładu, gdzie $Q = V \cdot k$. to natężenie ruchu wyrażone w [P/h], V – średnia prędkość pojazdów na określonym odcinku wyrażona w [km/h], k – gęstość ruchu wyrażona w [P/km]. Dla odpowiednio małego Q możemy osiągnąć satysfakcjonującą płynność ruchu, analogicznie dość duża wartość Q może oznaczać bardzo powolną jazdę pojazdów bądź ich całkowite zatrzymanie.

Stosując metodę największej wiarygodności wyznaczmy układ równań (10):

$$ENW(\delta^*, \alpha^*) = \begin{cases} \sum_{i=1}^n \ln(Q_i / \delta) - \sum_{i=1}^n \ln(Q_i / \delta)^\alpha \ln(Q_i / \delta) + n / \alpha = 0 \\ \sum_{i=1}^n \ln(Q_i / \delta)^\alpha - n = 0 \end{cases} \quad (10)$$

ENW parametru skali ma postać (11):

$$\delta^* = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Q_i^\alpha \ln(Q_i) \quad (11)$$

Natomiast $ENW\alpha^*$ wyznaczamy rozwiązując równanie:

$$\alpha^* = \frac{\sum_{i=1}^n Q_i^\alpha \ln(Q_i)}{\sum_{i=1}^n Q_i^\alpha} - \frac{1}{\alpha} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \ln(Q_i). \quad (12)$$

Można przyjąć, że niezawodność opisanego wyżej systemu będzie prawdopodobieństwem określającym utracenie płynności p (wartości poniżej pewnego ustalonej granicznej wartości) sterowania sygnalizacją świetlną dla pewnych parametrów w dziedzinie czasu działania systemu, będzie dana dystrybucją gęstości prawdopodobieństwa określanego rozkładem Waibulla (13):

$$R(Q) = \begin{cases} 1 - \int_0^Q \frac{\alpha u^{\alpha-1}}{\delta^\alpha} \exp(-(u/\delta)^\alpha) dQ & \text{dla } Q \geq 0 \\ 1 & \text{dla } Q < 0 \end{cases} \quad (13)$$

W badaniach zbierano w tym samym czasie próbki pomiarowe na odcinku Psie-Pole → Krzywoustego → Kochanowskiego → Plac Grunwaldzki → Trasa WZ → Legnicka → Lotnicza → Pilczycka. Dane jakie zbierano na 8 dużych skrzyżowaniach obejmowały średnią prędkość pojazdów oraz gęstość ruchu. Na podstawie uzyskanych danych przeprowadzono szereg symulacji komputerowych bazujących na metodzie klasycznej i inteligentnej oraz wyznaczono na podstawie rozkładu Weibulla $W(\alpha; \delta)$ niezawodność owych systemów. Do badań symulacyjnych zastosowano program MATLAB [4]. Na podstawie uzyskanych wyników sporządzono następującą charakterystykę niezawodności:

Uzyskane wyniki w godzinach największego natężenia ruchu wykazały, że niezawodność inteligentnych systemów jest wyższa niż systemów klasycznych. Zauważmy, że przy płynność w granicach 70% w przypadku algorytmu inteligentnego przy założeniu że pojazdy poruszają się z prędkością 50 km/h jest zachowana przy około 560 pojazdach. Natomiast dla algorytmu klasycznego przy około 260 pojazdach.

Rys. 1 Charakterystyka niezawodności inteligentnego systemu sterowania sygnalizacją świetlną

Bardzo duża sprawność rzędu 85% jest zachowana w przypadku metody inteligentnej przy około 500 pojazdach, a w przypadku metody klasycznej przy około 200 pojazdach. Różnica $P = R_{\text{inteligentny}}(Q) - R_{\text{klasyczny}}(Q) = 40,12\%$ dla $Q \in (0; 50000)$. Oznacza to, że średnio o około 40% algorytmy inteligentne sprawniej sterują sygnalizacją świetlną niż ich klasyczne odpowiedniki.

4. Podsumowanie

W artykule zaprezentowano metody optymalizacji ciągłości ruchu na drogach z wykorzystaniem inteligentnych systemów sterujących sygnalizacją świetlną. Skonstruowano model niezawodności takiego systemu wykorzystując średnią prędkość pojazdów na określonym odcinku wyrażoną w [km/h] oraz k – gęstość ruchu wyrażoną w [P/km]. Model niezawodności pozwala określić prawdopodobieństwo utraty płynności ruchu w jednostce czasu, przy zmieniających się warunkach na drodze. Zastosowanie ów modelu możemy ugruntować w szeroko pojętych systemach sterowania sygnalizacją świetlną wykorzystującą algorytmy genetyczne. Wykazano również, że niezawodność inteligentnych systemów sterowania sygnalizacją świetlną jest istotnie wyższa

o około 40% niż klasycznych sygnalizatorów bądź tych opartych tylko i wyłącznie na czujnikach ruchu.

5. Literatura

- [1] Migdalski J. i inni: *Poradnik niezawodności. Podstawy matematyczne*. Wydawnictwa Przemysłu Maszynowego „WEMA”, Warszawa, 1982
- [2] Topolski M., *Komputerowe algorytmy rozpoznawania sekwencyjnego łączące teorię zbiorów rozmytych z teorią Dempstera-Shafera*. Rozprawa doktorska, PRE 01/2008, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2008.
- [3] *Transport miejski. Ekonomia i organizacja*, red. O. Wyszomirski, Wydawnictwo Uniwersytetu Gdańskiego, Gdańsk 2008,
- [4] Regel W.: *Statystyka matematyczna w programie Matlab*. Wydawnictwo „MIKOM”, Warszawa, 2003

dr inż. Katarzyna Topolska. W 2007 uzyskany stopień doktora w Instytucie konstrukcji i eksploatacji maszyn Politechniki Wrocławskiej. Od 2003 zatrudniona w Międzynarodowej Wyższej Szkole Logistyki i Transportu we Wrocławiu. Obecnie zatrudniona na stanowisku adiunkta. Od 2009 współpraca z Państwową Wyższą Szkołą w Wałbrzychu na stanowisku starszego wykładowcy. Prowadzenie szkoleń z zakresu logistyki, zarządzania, zarządzania logistycznego i systemów wspomagających procesy logistyczne.

dr inż. Mariusz Topolski. W 2008 uzyskany stopień doktora na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej. Od 2004 zatrudniony w Międzynarodowej Wyższej Szkole Logistyki i Transportu we Wrocławiu. Obecnie zatrudniony na stanowisku adiunkta. Od 2010 współpraca z Państwową Wyższą Szkołą w Wałbrzychu na stanowisku starszego wykładowcy. Prowadzenie licznych szkoleń z zakresu sieci komputerowych, systemów operacyjnych, języków programowania C, inżynierii oprogramowania (prowadzenie kompleksowo projektu informatycznego), grafiki komputerowej.