ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: TRANSPORT z. 50 Nr kol. 1607

Grzegorz SIERPIŃSKI[1]

BUDOWA MODELU SYMULACYJNEGO – TEORETYCZNE PODSTAWY KONSTRUKCJI SYMULATORA SKRZYŻOWANIA Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNĄ

Streszczenie. W artykule omówiono proces tworzenia modelu symulacyjnego oraz przedstawiono założenia do budowy symulatora skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Ponadto opisano strumienie zgłoszeń pojazdów i podstawowe zależności między nimi.

CREATING THE SIMULATION MODEL – THEORETICAL FUNDAMENTALS OF THE SIMULATOR OF THE INTERSECTION WITH TRAFFIC LIGHTS

Summary. The article deals with a creation process of simulation model and assumptions for designing the simulator program of the intersection with traffic lights. Traffic flows and their fundamental relations have been also described.

1. PODSTAWOWE POJĘCIA

Symulacja komputerowa, jak podaje encyklopedia [7], to metoda wnioskowania o zachowaniu się obiektów rzeczywistych na podstawie obserwacji programów komputerowych symulujących to zachowanie. Stosowana, gdy bezpośrednie obserwowanie zachowania się obiektu jest trudne lub niemożliwe.

Aby omówić proces symulacji, należy najpierw zdefiniować pojęcia takie, jak:
- system;
- element systemu;
- stan systemu;
- model systemu.

System stanowi zbiór elementów wzajemnie ze sobą powiązanych określonymi zależnościami. Każdy *element systemu* ma swoje właściwości, zwane atrybutami. Właściwości poszczególnych elementów, jak i całego systemu zmieniają się w czasie. Określenie wszystkich zależności oraz właściwości elementów systemu w danej chwili nazywamy *stanem systemu*. *Model systemu* zwykle stanowi jedynie częściową reprezentację systemu.

Przykładem systemu może być skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną. Elementami takiego systemu są między innymi pojazdy oraz urządzenia sygnalizacyjne. Atrybuty (cechy) pojazdu to np.: rodzaj, czas przybycia, prędkość, odległość od skrzyżowania; podczas gdy cechą sygnalizacji jest jej program, a poszczególnych sygnalizatorów ich lokalizacja. Pojazdy

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

są zależne od wyświetlanych aktualnie sygnałów oraz wzajemnie od siebie. W przypadku sygnalizacji wzbudzanej pojawienie się pojazdu na wlocie może determinować zmianę świateł na sygnalizatorach.

2. TWORZENIE MODELU SYMULACYJNEGO

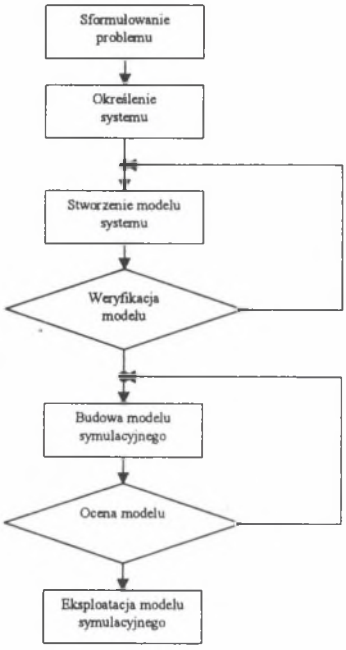
Aby stworzyć odpowiedni model systemu należy określić, jakie postawić mu wymagania oraz jakie procesy rzeczywistego systemu ma odzwierciedlać. W ten sposób tworzona jest lista elementów istotnych z punktu widzenia realizowanego celu symulacji. Następnie budowana jest sieć zależności określających współfunkcjonowanie poszczególnych elementów w systemie. Po ich wyodrębnieniu należy określić warunki początkowe oraz graniczne, to znaczy stan modelu systemu na początku symulacji oraz możliwe zmiany (zwane dalej zdarzeniami) w tym systemie. Proces kreowania systemu rzeczywistego w modelu jest jednym z najistotniejszych i zarazem najtrudniejszych etapów tworzenia modelu symulacyjnego. Jest on wielokrotnie powtarzany aż do uzyskania rezultatów w pełni odpowiadających oczekiwaniom twórcy.

Model, który powstał na podstawie powyższych czynności, można nazwać modelem symulacyjnym systemu, ponieważ zawiera cechy systemu rzeczywistego i zależności zachodzące pomiędzy nimi w czasie. Model taki można przedstawić w formie języka naturalnego, schematów blokowych, zależności matematycznych, a także jako komputerowy model symulacyjny w postaci programu komputerowego, napisanego w jednym z dostępnych języków programowania.

Proces tworzenia modelu symulacyjnego przedstawiono na rysunku 1. Schemat blokowy zawiera jedynie główne czynności oraz ogólne określenia. Weryfikacja modelu systemu polega na stwierdzeniu, czy w jego opisie nie pominięto ważnych cech, które należy analizować, aby uzyskać pożądany cel lub które mają bezpośredni wpływ na nie. Gdy wszystkie cechy rzeczywistego systemu są uwzględnione, można przystąpić do realizacji kolejnej czynności, którą jest budowa modelu symulacyjnego (np. w formie programu komputerowego). Ocena systemu polega na sprawdzeniu jego adekwatności poprzez porównanie z rzeczywistym systemem. Ocena następuje po przeprowadzeniu szeregu testów zgodności. Do oceny adekwatności stosuje się między innymi następujące testy [8]:

- obserwację pracującego modelu przez osoby nie związane z opracowaniem tego modelu;
- prześledzenie w odwrotnym kierunku toku rozumowania przyjętego w trakcie opracowywania modelu;
- sprawdzenie, czy model nie generuje absurdalnych wyników dla typowych danych wejściowych;
- sprawdzenie, czy otrzymane wyniki mają sens i czy istnieje ich interpretacja w rzeczywistym systemie.

Jeśli wiarygodność modelu nie zostanie podważona, model taki uważany jest za adekwatny i nadaje się do eksploatacji.



Rys. 1. Proces tworzenia modelu symulacyjnego
Fig. 1. Creation process for the simulation model

3. ELEMENTY SYSTEMU – DANE WEJŚCIOWE

Skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną jako system jest zbiorem wielu elementów, między którymi zachodzą skomplikowane procesy i zależności. Opisując konkretne skrzyżowanie należy podać elementy stanowiące dane wejściowe do symulatora. Są to:

a) geometria skrzyżowania:
- liczba wlotów (skrzyżowanie trójwlotowe lub czterowlotowe)
- liczba pasów na poszczególnych wlotach;
- możliwe relacje (kierunki ruchu) z danego pasa (L, W, P, LW, WP, LWP);
- szerokości pasów ruchu [m];
- promienie skrętów w lewo i prawo dla pasów, na których takie relacje występują [m];
- pochylenia podłużne na wlotach [%];
- powierzchnia akumulacyjna– rozumiana jako liczba pojazdów (skręcających w lewo), które mogą oczekiwać wewnątrz skrzyżowania na możliwość jego opuszczenia bez zakłócania ruchu pozostałych pojazdów [P];

b) natężenia na pasach ruchu [P/h];

c) struktura kierunkowa na pasie [%] lub [P/h];

d) struktura rodzajowa na pasie [%] lub [P/h]:
- SOD – samochody osobowe i dostawcze;
- C – samochody ciężarowe;
- CP – samochody ciężarowe z przyczepą lub naczepą;
- A – autobusy;

- M – motocykle;
- R – rowery;

e) program sygnalizacji na skrzyżowaniu.

4. STRUMIEŃ ZGŁOSZEŃ POJAZDÓW

Aby symulować ruch drogowy zbliżony do rzeczywistego, wskazana jest generacja pojazdów w odstępach o odpowiednim rozkładzie prawdopodobieństwa. Z badań wynika, że w przypadku ruchu swobodnego (mały stopień obciążenia) pojazdy zgłaszają się całkowicie niezależnie od siebie (zgłoszenia poissonowskie). Taki przypadek dobrze opisuje rozkład wykładniczy przesunięty (rozkład Erlanga 1 rzędu) odstępów czasowych między zgłoszeniami kolejnych pojazdów [4, 8]:

$$P(h \geq t) = e^{-\frac{(t-t_0)}{(\bar{t}-t_0)}} \tag{1}$$

gdzie:

$\bar{t}$ - średni odstęp czasu między pojazdami;

t_0 - minimalny odstęp czasu między pojazdami na jednym pasie.

Minimalny odstęp stanowi stałe przesunięcie rozkładu wykładniczego. Zatem dany odstęp czasowy to suma zmiennej losowej i minimalnego odstępu (rys. 2.):

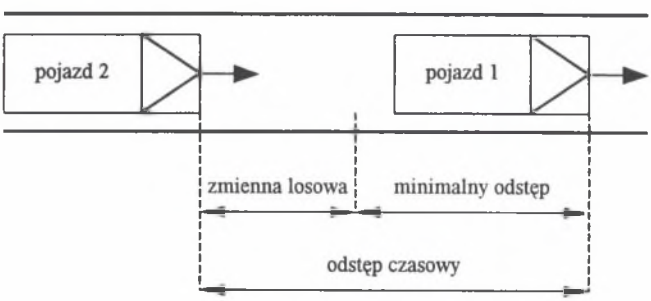
$$t = t_{los} + t_0 \tag{2}$$

gdzie:

t - odstęp czasu między pojazdami;

t_{los} - zmienna losowa;

t_0 - minimalny odstęp czasu między pojazdami na jednym pasie.



Rys. 2. Odstęp czasowy między kolejnymi zgłoszeniami pojazdów
Fig. 2. Time distance between vehicles

Gdy natężenie ruchu wzrasta zbliżając się do przepustowości zgłoszenia „tracą niezależność" na rzecz czynnika deterministycznego. Prędkość swobodna przechodzi w prędkość zależną od pojazdu poprzedzającego, aż do prędkości „korkowej". W takim przypadku odstępy między zgłoszeniami przyjmują rozkład Erlanga:

$$P(h \geq t) = \frac{\left(\frac{t-t_0}{\bar{t}-t_0}\right)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\frac{(t-t_0)}{(\bar{t}-t_0)}} \tag{3}$$

gdzie:

$\bar{t}$ - średni odstęp czasu między pojazdami;

t_0 - minimalny odstęp czasu między pojazdami na jednym pasie;

k - parametr rozkładu ($k \in N$).

Parametr k rozkładu Erlanga rośnie wraz ze wzrostem czynnika deterministycznego, czyli wówczas, gdy stopień obciążenia pasa ruchu zbliża się do jedności.

Każdy strumień pojazdów musi mieć określony pas, na którym się zgłasza. Ponadto każdy pojazd w danym strumieniu powinien mieć zadany kierunek jazdy i określony rodzaj.

5. PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI MIĘDZY POJAZDAMI

Zakłada się, że potoki wejściowe pojazdów na poszczególnych pasach ruchu są niezależne w sensie probabilistycznym [12]. Skrzyżowanie może obsługiwać równocześnie kilka pojazdów, przy czym liczba jednocześnie obsługiwanych pojazdów zależy od geometrii skrzyżowania oraz od rodzajów poszczególnych pojazdów.

Każdy pojazd wjeżdżający za skrzyżowanie powinien mieć określony rodzaj, kierunek ruchu oraz pas, na którym następuje zgłoszenie. Dlatego należy rozróżnić odpowiednie *kategorie ruchu:*

$$k_1, k_2, \ldots, k_n \tag{4}$$

gdzie k_i oznacza i-tą kategorię ruchu (np.: kategoria 1 oznacza wlot 1, pas 1, pojazd SOD jadący na wprost itd.). Ruch pojazdu danej kategorii może dopuszczać jednoczesny ruch innej kategorii, ale może także eliminować na pewien czas ruch innej kategorii.

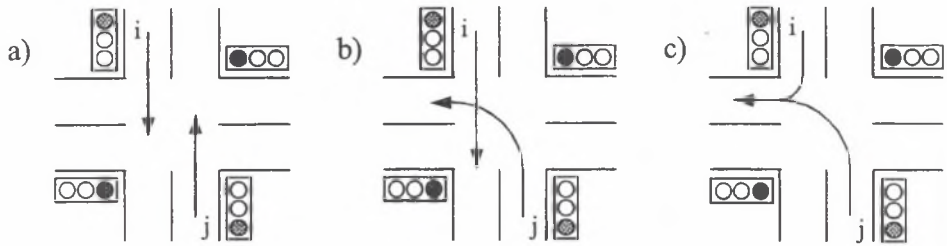
Wzajemne zależności pomiędzy poszczególnymi kategoriami najłatwiej wyrazić we wspólnej *macierzy zależności:*

$$Z=[z_{ij}], \qquad \text{dla } i,j=1,2\ldots n. \tag{5}$$

W przypadku skrzyżowania z sygnalizacją świetlną można wyróżnić cztery podstawowe rodzaje zależności między kategoriami ruchu:

- kategorie niezależne – to takie, które nie mają punktów kolizji – dla nich $z_{ij}=0$ (rys. 3a);
- kategorie z jednym punktem kolizji, których trajektoria ruchu krzyżują się, wtedy z_{ij} odpowiada czasowi od chwili wjazdu do przekroczenia punktu kolizji przez pojazd kategorii i; (rys. 3b)
- kategorie, których trasy łączą się, to znaczy pojazdy kończą obsługę na tym samym wylocie, dla których z_{ij} stanowi czas przejazdu pojazdu kategorii i (rys. 3c);
- kategorie zgłaszające się na wspólnym pasie, dla których z_{ij} odpowiada czasowi następstwa za pojazdem i.

Oczywiście, liczba rodzajów zależności może ulec zmianie z powodu różnych programów sygnalizacji. Z uwagi na różne rozwiązania geometryczne skrzyżowań macierz zależności nie jest macierzą symetryczną.



Rys. 3. Podstawowe rodzaje zależności między kategoriami ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną
Fig. 3. Basic relations between the traffic category on the intersection with traffic lights

Na skrzyżowaniach oprócz sygnalizacji priorytety ruchu są określone również przez znaki i przepisy ruchu drogowego. W opisie modelu symulacyjnego można zbudować *macierz priorytetów*

$$P_{ij}=[p_{ij}], \qquad \text{dla } i,j=1, 2,\ldots,n; \tag{6}$$

Poszczególne elementy macierzy definiują, czy dana kategoria i ma pierwszeństwo przed określoną kategorią j.

Macierz zależności w połączeniu z macierzą priorytetów dają podstawy do symulacji ruchu na skrzyżowaniu, ponieważ określają reguły obsługi pojazdów.

6. PODSUMOWANIE

Wraz z rozwojem inżynierii ruchu zaczęły się pojawiać problemy, do których rozwiązania empiryczne zbieranie danych stało się mało wydajne a czasem wręcz niemożliwe. Programy symulacyjne stworzyły możliwości wnikliwych analiz potoków ruchu.

Podczas budowy modelu symulacyjnego ruchu pojazdów, będącego modelem stochastycznym, podstawowym zadaniem projektanta jest zaprogramowanie generatora danych o odpowiednio dobranym rozkładzie prawdopodobieństwa. W przypadku skrzyżowań drogowych najodpowiedniejszy jest generator oparty na rozkładzie Erlanga, a dla małego ruchu rozkładzie wykładniczym przesuniętym (rozkładzie Erlanga 1 rzędu).

Skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną stanowi skomplikowany system, w którym poszczególne elementy w różny sposób są od siebie uzależnione. Jedynie dobry opis tych zależności pozwala na uzyskanie zadowalających wyników symulacji.

Literatura

1. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKiŁ, Warszawa 1999.
2. Ewans G. W., Wallance G. F. Sutherland G. L.: Symulacja na maszynach cyfrowych. WNT, Warszawa 1973.
3. Fishman G. S.: Symulacja komputerowa. Pojęcia i metody. Państwowe Wydawnictwo Ekonomiczne, Warszawa 1981.
4. 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

5. Kuwahara M., Horiguchi R., Yoshii T.: Standard Verification Proces for Traffic Flow Simulation Model, Traffic Simulation Committee, Japan Society of Traffic Engineers, 2002.
6. Perkowski P.: Technika symulacji cyfrowej. WNT, Warszawa 1980.
7. Popularna Encyklopedia Powszechna, Kraków 1998.
8. Praca zbiorowa pod red. Krystek R.: Symulacja ruchu potoku pojazdów. WKiŁ, Warszawa 1980.
9. Rajski J., Tyszer J.: Modelowanie i symulacja cyfrowa. Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 1986.
10. Tracz M., Allsop R. E.: Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. WKiŁ, Warszawa 1990.
11. Webster F. V.: Traffic signal settings. Road Research Paper No. 39, Her Majesty's Stationary Office, London 1958.
12. Woch J.: Teoria potoków ruchu (w druku).

Recenzent: Dr hab. Tomasz Amboziak, prof. Politechniki Warszawskiej

Abstract

Due to the expansion of traffic engineering some problems that empiric methods are time-consuming and very often impossible to apply have occurred. Simulating programs though make possible to apply deep traffic analysis.

The traffic simulation model is a stochastic model and the main aim for a designer is to create the data generator with a sufficient probability distribution. In case of intersections to be described the most sufficient is the generator based on the Erlang distribution. And for the low traffic the most adequate is the generator based on the shifted exponential distribution.

The intersection with traffic lights is a very complicated structure and all components are dependable from each other in various way. Only a good description of those relations allows receiving reasonable results of the simulation.