

Grzegorz SIERPIŃSKI<sup>1</sup>

## OPÓŹNIENIE „KOLIZYJNE” NA SKRZYŻOWANIACH Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA – POJAZDY SKRĘCAJĄCE W LEWO

**Streszczenie.** W artykule omówiono opóźnienia powstające podczas oczekiwania na możliwość przejazdu przez skrzyżowanie pojazdów skręcających w lewo. Zaprezentowano także wyniki obserwacji i pomiarów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną.

### „INTERFERENCE” DELAY ON INTERSECTIONS WITH TRAFFIC LIGHTS – LEFT-TURN VEHICLES

**Summary.** The article deals with a delay appears during passing the junctions by left-turn vehicles. The results of observation and measurements on several intersections with traffic lights were presented.

The intersection with traffic lights is a very complex 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.

For the road traffic models very important are random variable that control the process behavior (various events to happen). As we will see, „interference” delay on intersections with traffic lights can be model applying Erlang’s distribution, or more general Gamma and Weibull’s distribution – it was proved by compatibility tests.

All the observations and measurements done will help creating the simulation model of the intersection with traffic lights.

#### 1. WPROWADZENIE

Krzyżowanie się torów jazd różnych pojazdów jest typowym manewrem w ruchach na wprost i lewoskrętach [2]. Punkty, w których krzyżują się tory pojazdów, są uważane za zasadnicze punkty kolizji decydujące o kolizyjności skrzyżowania. W przypadku skrzyżowań z sygnalizacją świetlną wiele punktów kolizji można wyeliminować przez odpowiednio zaprojektowany program sygnalizacji – odpowiednie przypisanie relacji do faz ruchu.

Zwykle przy zastosowaniu sygnalizacji na skrzyżowaniach o małym natężeniu ruchu dopuszcza się kolizję strumienia pojazdów skręcających w lewo ze strumieniem nadrzędnym – ruchem na wprost bądź w prawo z przeciwka. Taka sytuacja powoduje powstawanie dodatkowych opóźnień pojazdów przy przejeździe przez skrzyżowanie. Pojazdy skręcające muszą ustępować potokowi nadrzędnemu, przez co niejednokrotnie utrudniają przejazd innym relacjom na wspólnym pasie ruchu.

<sup>1</sup> Wydział Transportu, Politechnika Śląska, Krasińskiego 8, 40-019 Katowice, grzegorz.sierpinski@polsl.pl

Pomiary dotyczące realizacji skrętu w lewo przeprowadzono z potrzeby uzyskania danych do budowy modelu ruchu potoków pojazdów na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Część uzyskanych wyników została zaprezentowana w artykule.

## 2. OPIS PROBLEMU

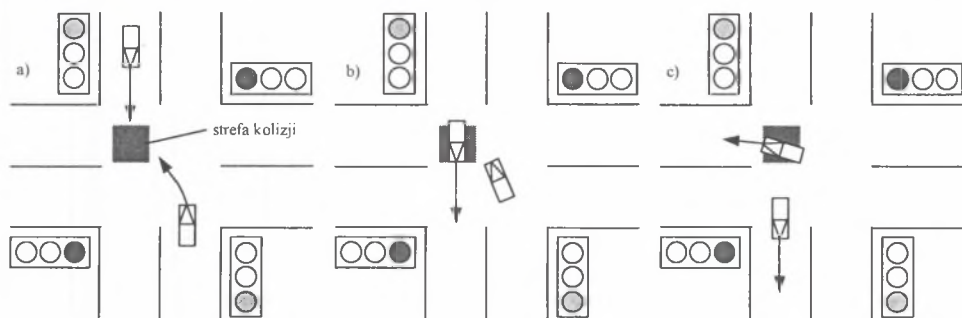
Oddziaływanie pojazdów kolizyjnych skręcających w lewo na inne relacje realizowane z tego samego pasa zostało uwzględnione w metodach przepustowościowych i szeroko opisane w literaturze przedmiotowej [m. in. 1, 2, 4, 6]. Pojazd skręcający w przypadku braku obszaru akumulacji blokuje ruch na pasie do czasu wystąpienia dostatecznie dużej luki w potoku nadrzędnym. Jednak w artykule rozważany będzie jedynie czas oczekiwania pojazdu skręcającego w lewo (lewoskrętu) – bez analizy zakłóconego ruchu pojazdów blokowanych.

Zasadniczo możliwe są trzy rodzaje obsługi lewoskrętu [4, 9]:

- przejazd przez skrzyżowanie z chwilą wyświetlenia sygnału zielonego (przed nadrzędnym strumieniem kolizyjnym);
- realizacja przejazdu po znalezieniu luki (w potoku nadrzędnym) o długości pozwalającej na przejazd podczas wyświetlania sygnału zielonego;
- zjazd ze skrzyżowania przy świetle żółtym lub na początku wyświetlania sygnału czerwonego – gdy potok nadrzędny zostaje „wstrzymany”.

Pierwszy przypadek obserwowany jest bardzo rzadko. Taki sposób realizacji przejazdu występuje przy sygnalizacji z podfazą dla relacji w lewo. Przy dużym natężeniu pojazdów relacji nadrzędnej najczęściej obserwowany jest przypadek trzeci.

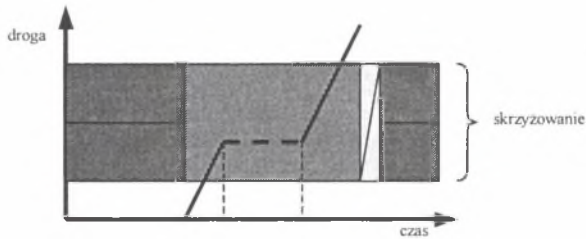
Obsłudze pojazdów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną towarzyszą opóźnienia powstające na wlotach. Opóźnienie „kolizyjne” można zdefiniować jako dodatkowy czas oczekiwania pojazdu (skręcającego w lewo). Wykonanie manewru skrętu w lewo przy występowaniu kolizji z ruchem z przeciwnika przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Realizacja skrętu w lewo na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną

Fig. 1. Left-turn on intersection with traffic lights

Graficznie opóźnienie „kolizyjne” zaznaczono na rysunku 2 linią przerywaną. Po spełnieniu odpowiednich warunków – zezwolenie na wjazd (zielone światło) oraz odczekaniu w kolejce na wlocie – pojazd zamierzający skręcić w lewo wjeżdża na skrzyżowanie. Tam oczekuje na lukę w strumieniu nadrzędnym.



Rys. 2. Graficzna interpretacja opóźnienia „kolizyjnego”  
Fig. 2. “Interference” delay – graphic interpretation

Opóźnienie „kolizyjne” stanowi składnik czasu obsługi pojazdu na skrzyżowaniu [10]. Jest to wielkość losowa uzależniona w dużym stopniu od natężenia na wlocie nadrzędnym.

### 3. POMIARY I ANALIZA WYNIKÓW

W ramach badań charakterystyk stochastycznych procesów zachodzących na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną wykonano pomiary na kilkunastu skrzyżowaniach Górnego Śląska. Mała liczba skrzyżowań, na których prowadzono obserwacje wynika z rzadkiego występowania organizacji ruchu, dla której w jednej fazie zezwala się na przejazd pojazdów skręcających w lewo wraz z relacją nadrzędną kolizyjną. Celem było uzyskanie charakterystyk czasów oczekiwania na możliwość przejazdu pojazdów skręcających w lewo.

Pomiary prowadzono w dni powszednie w „szczytce”, jak również poza godzinami szczytu w czerwcu, wrześniu i październiku 2004.

Wykonano pomiary następujących charakterystyk:

- czasy przejazdu pojazdów skręcających w lewo;
- czasy oczekiwania na możliwość przejazdu – opóźnienie „kolizyjne”;
- liczba pojazdów skręcających w lewo w danym cyklu (podczas wyświetlania sygnału zielonego oraz zjeżdżających ze skrzyżowania przy świetle żółtym lub na początku wyświetlania sygnału czerwonego);
- natężenie pojazdów nadrzędnej relacji kolizyjnej w danym cyklu.

Wszystkie analizowane skrzyżowania posiadały program sygnalizacji, w którym w jednej fazie zezwolenie na przejazd (zielone światło) otrzymywały relacje: skręt w lewo oraz jazda na wprost i/lub skręt w prawo z przeciwka. W jednym przypadku – skrzyżowanie z trzema pasami ruchu nadrzędnego – występowało pewne przesunięcie faz umożliwiające, bez zakłóceń, zjazd części lewoskrętów. Dla tego skrzyżowania zastosowano nieco inne reguły obserwacji.

Zweryfikowano hipotezy o zgodności rozkładów opóźnień „kolizyjnych” z podstawowymi rozkładami statystycznymi: Poissona, Erlanga, wykładniczym, gamma itd. Do weryfikacji użyto pakietu STATGRAPHICS. Jest to rozbudowany program służący do analizy statystycznej wyników wykonanych pomiarów. Wynik każdego wykonanego testu w tym pakiecie poznaje się po otrzymanej wartości poziomu istotności. Przyjęto, zgodnie z literaturą [8], poziom istotności dla badaniach transportowych równy 0,05. Otrzymane wyniki – liczbę korzystnych weryfikacji zgodności rozkładów empirycznych z rozkładami teoretycznymi w zależności od liczby pasów, na których występowały nadrzędne strumienie kolizyjne – zestawiono w tablicy 1.

Tablica 1

Weryfikacja hipotez zgodności w zależności od liczby pasów relacji kolizyjnej

L. pasów	Poissona	Chi-Square	Erlanga	Wykładniczy	Gamma	Log-normalny	Normalny	Trójkątny	Jednostajny	Weibulla
1			5		3					3
2		1	2		1	1		1	1	1
3			2	1	1	2			1	1
Ogółem		1	9	1	5	3		1	2	5

Weryfikacja wykazała, iż w przypadku relacji skrzyżnych, dla których potok nadrzędny występuje jedynie na jednym pasie, rozkłady empiryczne są zgodne z trzema rozkładami teoretycznymi: Erlanga, gamma i Weibulla. Rozkład Weibulla stanowi trójparametrową odmianę rozkładu gamma. Rozkład Erlanga, najliczniej „reprezentowany” podczas weryfikacji, to szczególny przypadek rozkładu gamma (gdy parametr kształtu rozkładu jest równy rzędowi rozkładu Erlanga). Rozkład Erlanga można opisać następująco:

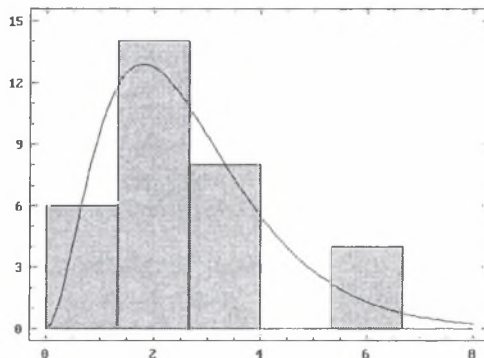
$$P(h \geq t) = \frac{\left(\frac{t-t_0}{\bar{t}-t_0}\right)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-\frac{(t-t_0)}{(\bar{t}-t_0)}} \quad (1)$$

gdzie:

$\bar{t}$  - wartość średnia opóźnienia „kolizyjnego”;

$t_0$  - wartość minimalna zaobserwowanego opóźnienia „kolizyjnego”;

$k$  - parametr rozkładu ( $k \in \mathbb{N}$ ).



Rys. 3. Histogram zmiennej losowej z wykresem funkcji gęstości analizowanego rozkładu teoretycznego otrzymany z programu STATGRAPHICS

Fig. 3. Histogram of random variable and the chart of density of theoretical distribution received with the STATGRAPHICS program

Gdy liczba pasów nadrzędnej relacji kolizyjnej była większa (2 lub 3 pasy), trudno wyodrębnić przeważający rozkład teoretyczny. W przypadku większej liczby pasów

większość lewoskrętów zjeżdżała ze skrzyżowania dopiero podczas nadawania sygnału żółtego bądź na początku sygnału czerwonego. Stąd opóźnienie „kolizyjne” zależało bardziej od chwili zgłoszenia skręcającego pojazdu niż od potoku nadrzędnego (w którym nie można było zaobserwować odpowiednich luk).

W kilku przypadkach weryfikacja wykazała zgodność z kilkoma rozkładami – stąd różnica między liczbą badanych skrzyżowań i liczbą pomyślnych weryfikacji.

Maksymalne zaobserwowane opóźnienie „kolizyjne” wynosi 27 s, co łącznie z czasem przejazdu dało 31 s. Zgodnie z amerykańskimi dyrektywami i standardami, jeżeli wartość całkowitego czasu przejazdu lewoskrętu przewyższa 35 s, to istnieje potrzeba wydzielenia fazy oraz pasa ruchu dla tej relacji [5, 7]. Przyjmując takie założenia, można stwierdzić, iż na obserwowanych skrzyżowaniach dobrze zaprojektowano organizację ruchu.

Wartość średnia zaobserwowanego opóźnienia „kolizyjnego” wynosiła, w zależności od stopnia obciążenia wlotu z relacją nadrzędną, 3 – 12 s.

#### 4. PODSUMOWANIE

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.

W modelach ruchu drogowego duże znaczenie mają występujące w nim zmienne losowe, które kontrolują zachowanie procesów, czyli występowanie różnych zdarzeń. Przeprowadzone badania dowodzą, iż opóźnienia „kolizyjne” na skrzyżowaniach można modelować stosując rozkład Erlanga bądź bardziej ogólne rozkłady – gamma i Weibulla. Przy większej liczbie pasów, na których występuje nadrzędny strumień kolizyjny, nie można zaobserwować dominacji konkretnego rozkładu teoretycznego.

Przy jednoczesnym wyświetleniu sygnału zielonego dla relacji kolizyjnych właściwie nie występuje przypadek przejazdu przez skrzyżowanie lewoskrętu przed relacją nadrzędną.

Wykonane obserwacje i pomiary będą pomocne przy budowie modelu symulacyjnego skrzyżowania z sygnalizacją świetlną.

#### Literatura

1. Akçelik R.: HCM 2000 Back of Queue Model for Signalised Intersections. Technical Note, September 2001.
2. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKiŁ, Warszawa 1999.
3. Gartner N., Messer C. J., Rathi A. K.: Traffic Flow Theory A State-of-the-Art Raport. Transportation Research Board, <http://www.cta.ornl.gov/cta/research/trb/tft.html>
4. Hauer E.: Left Turn Protection, Safety, Delay and Guidelines: A Literature Review. Toronto 2004.
5. Iowa Statewide Urban Design Standards Manual. Iowa State University 2002.
6. Krystek R. i inni: Symulacja ruchu potoku pojazdów. WKiŁ, Warszawa 1980.
7. Louisiana Department of Transportation and Development Office of Engineering: Warrants for Protected Left Turn Signal Phasing on Streets and Highways. Engineering Directives and Standards, Louisiana 1985.
8. Praca zbiorowa pod red. Janecki R., Pawlicki J.: Laboratorium statystyki systemów i procesów transportowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
9. Praca zbiorowa pod red. Tracz M.: Modelowanie procesów ruchu. Podstawy rozwoju środków i systemów transportowych CPBP 02.19, Kraków 1990.

10. Sierpiński G.: Obsługa pojazdów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z 56, s. 347 – 352, Gliwice 2004.
11. Urbanik II T., Sunkari S. R., Barnes K., Meadors A. C.: Adaptive Left Turn Phasing. Texas 2000.
12. Woch J.: Teoria potoków ruchu (w druku).

Recenzent: Dr hab. inż. Romuald Szopa, prof. Politechniki Częstochowskiej