ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2001
Seria: TRANSPORT z. 42 Nr kol. 1524

Ireneusz CELIŃSKI

STOCHASTYCZNE CHARAKTERYSTYKI STRUMIENI RUCHU NA SKRZYŻOWANIACH DROGOWYCH

Streszczenie. W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczące charakterystyk stochastycznych strumieni ruchu podporządkowanych i uprzywilejowanych na skrzyżowaniach drogowych. W przypadku strumieni podporządkowanych wyniki empiryczne analizowano pod kątem zależności otrzymanych rozkładów statystycznych od rodzaju organizacji ruchu na wlocie podporządkowanym oraz pory dnia. Wyniki dotyczące strumieni uprzywilejowanych przedstawiono w zależności od pory dnia i liczby kierunków realizowanych na drodze głównej skrzyżowania. W ramach badań wykonano ponadto obliczenia średnich parametrów otrzymanych rozkładów.

STOCHASTIC CHARACTERISTIC OF TRAFFIC STREAMS ON ROAD JUNCTIONS

Summary. Results of researches relating stochastic characterizations of traffic streams, subordinated and privileged, on road junction, has been presented in this article. Results one analysed under executioner of organization of traffic on subordinated inflow and times of day. One passed also researches for streams of superior traffic.

1. WPROWADZENIE

Ruch pojazdów na skrzyżowaniu drogowym podlega wpływowi wielorakich czynników, zmieniających charakterystyki strumienia ruchu w czasie i przestrzeni. Dotyczy to zarówno skrzyżowań nieregulowanych, jak również skrzyżowań regulowanych, wyposażonych w sygnalizację świetlną. Mając na uwadze powyższe, należy traktować ruch pojazdów na skrzyżowaniu jako proces stochastyczny [1]. Losowym wahaniom podlegają takie charakterystyki strumienia ruchu drogowego, jak: natężenie ruchu pojazdów, gęstość ruchu pojazdów, czas oczekiwania na wlocie podporządkowanym na włączenie się do ruchu, rozkład odstępów czasu między pojazdami w strumieniu ruchu itp. Znajomość charakterystyk stochastycznych strumieni ruchu na skrzyżowaniu jest niezbędna celem, modelowania i symulacji komputerowej takich układów drogowych. Symulacja komputerowa skrzyżowań drogowych znajduje szerokie zastosowanie ze względu na fakt, że jest metodą syntetycznego eksperymentowania o elastyczności znacznie przewyższającej badania laboratoryjne i badania empiryczne w terenie [2]. Model symulacyjny jest odpowiednikiem logiczno-matematycznym systemu (skrzyżowania) zaprojektowanym w celu jego rozwiązania, w przypadku gdy takie rozwiązanie na drodze analitycznej jest niemożliwie lub skomplikowane.

Rozwiązanie otrzymane za pomocą modelu symulacyjnego może mieć na celu następujące zastosowanie:

- ocenę wydajności projektowanego lub istniejącego systemu (kryterium ekonomiczne),
- eksperymentalne projektowanie systemu (kryterium celowe),
- ustalenie parametrów systemu (kryterium jakościowe) [3].

Modelowanie symulacyjne (techniki Monte Carlo) należy stosować do opisu działania procesów, które zawierają w sposób istotny zmienne losowe, a więc także symulacji ruchu na skrzyżowaniach drogowych [4]. W celu przeprowadzenia symulacji ruchu skrzyżowania drogowego należy dysponować modelem, którego jednym z podstawowych składników są generatory liczb losowych, zgodnych z rozkładami zmiennych charakteryzujących procesy stochastyczne zachodzące na skrzyżowaniu [5]. W opisie procesów związanych z symulacją ruchu drogowego przyjęło się stosować następujące rozkłady zmiennych losowych (poniżej przedstawiono kilka przykładowych) [1]:

- rozkład odstępów czasu między pojazdami w strumieniu ruchu symulujemy za pomocą rozkładu logarytmiczno–normalnego

$$f(t) = \frac{1}{(t-c)v\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-[\ln(t-c)-\mu]^2}{2v^2}} \quad dla \quad t > c, v > 0$$

- rozkład odstępów czasu między pojazdami w strumieniu ruchu symulujemy również za pomocą rozkładu wykładniczego przesuniętego:

$$f(t) = \frac{\lambda}{1-\lambda a} e^{-\lambda \frac{t-a}{1-\lambda a}} \quad dla \quad t > a,$$

- rozkład normalny odpowiada rozkładowi prędkości chwilowej pojazdów w ruchu swobodnym:

$$f(v) = \frac{1}{\delta_v \sqrt{2\pi}} e^{\frac{(v-\bar{v})^2}{2\delta_v^2}}$$

gdzie: $\bar{v}$ - prędkość średnia. Wszystkie z przytoczonych powyżej rozkładów mają z reguły zastosowanie w symulacji strumieni ruchu swobodnego (kierowca ma możliwość wyboru prędkości). W przypadku symulacji ruchu strumienia, w którym część z pojazdów nie porusza się ruchem swobodnym (porusza się ze średnią prędkością całego strumienia), można w celu jego opisu użyć rozkładów złożonych, np. rozkład Hypererlanga [1]:

$$P(h \geq t) = (1-\alpha) e^{-\frac{t-t_{01}}{\bar{t}_1 - t_{01}}} + \alpha e^{-k\frac{t-t_{02}}{\bar{t}_2 - t_{02}}} \sum_{n=0}^{k-1} \frac{\left[\frac{t-t_{02}}{\bar{t}_2 - t_{02}}\right]^n k}{n!}$$

gdzie:

$t_{01}, \bar{t}_1, t_{02}, \bar{t}_2$ - odpowiednio: min. i średni odstęp czasu pojazdów z grupy swobodnych i nieswobodnych,

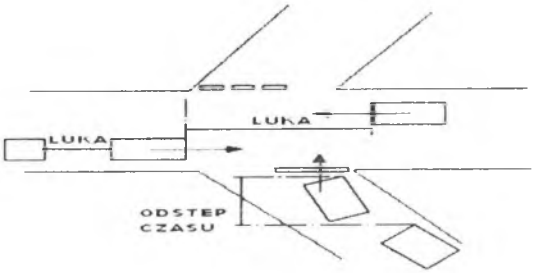
$1-\alpha, \alpha, k$ - odpowiednio: udziały w strumieniu poj. swobodnych i nieswobodnych oraz parametr korygujący zanik cech stochastycznych w strumieniu ruchu nieswobodnego.

Znajomość typów rozkładów odpowiadających procesom zachodzącym na skrzyżowaniu jest jednym z podstawowych warunków skonstruowania efektywnego modelu symulacyjnego.

2. BADANIE STOCHASTYCZNYCH CHARAKTERYSTYK RUCHU POJAZDÓW NA SKRZYŻOWANIACH, WYNIKI POMIARÓW

W ramach badań charakterystyk stochastycznych procesów zachodzących na skrzyżowaniach drogowych zweryfikowane zostały hipotezy o zgodności rozkładów pewnych procesów zachodzących na tych obiektach z podstawowymi rozkładami statystycznymi: Poissona, Erlanga, Gamma, przesuniętym wykładniczym, wykładniczym, normalnym, trójkątnym itp. Do weryfikacji hipotez użyto testów zgodności chi-square i lambda-Kołmogorowa [6]. W testach zgodności dla weryfikacji hipotez przyjęto poziom istotności $\alpha = 0{,}05$. Badania przeprowadzono w październiku i listopadzie 2001 na terenie ścisłego śródmieścia Katowic. Badano zarówno charakterystyki strumieni ruchu na wlotach podporządkowanych, jak również charakterystyki strumieni ruchu nadrzędnego. Dla strumieni ruchu podporządkowanego dokonano pomiaru następujących charakterystyk:

- wielkość kolejki na wlocie podporządkowanym,
- czas oczekiwania poszczególnych pojazdów na wlocie podporządkowanym,
- odstęp czasu pomiędzy pojazdami na wlocie podporządkowanym (czas następstwa),
- lukę pomiędzy pojazdami w strumieniu uprzywilejowanym (zobacz: rys. 1).



Rys.1. Opis badanych parametrów
Fig. 1. Description of parameters

Charakterystyki powyższe sporządzono dla 129 wybranych obiektów o różnej organizacji ruchu dla strumienia podporządkowanego:

- „ustąp pierwszeństwa przejazdu" (30 obiektów),
- „znak STOP" (33 obiekty),
- „zielona strzałka w prawo" (33 obiekty),
- „zielona strzałka w lewo" (33 obiekty).

Każdy obiekt został poddany badaniu w trzech okresach pomiarowych: szczytu porannego (6.30-8.30), szczytu popołudniowego (13.30-17.00) oraz w czasie od 9.30-12.30. Dokładność pomiaru wynosiła 1[s]. Tablica 1 przedstawia zweryfikowane hipotezy (liczbę pomyślnych weryfikacji) odnośnie do zgodności rozkładów empirycznych z rozkładami teoretycznymi w zależności od organizacji ruchu na wlocie podporządkowanym (różnice w liczbie obiektów wynikają z przyczyn technicznych związanych z algorytmem obliczeniowym).

Tablica 1

Org ruchu*	Rozkład czasu	Poissona	Chi-square	Erlanga	EXP	Fishera	Gamma	Log-normal	Normal	Triang.	Uniform	Weibulla
A7	oczekiwania		1	1	5			7	7			4
	odstępu			2	7		4	8	5			4
B20	oczekiwania	3	6		2		1	8	4	1	1	3
	odstępu		1	4	7			14	3			2
S2 P	oczekiwania	2	2	1	5			6	10		2	4
	odstępu				6		3	11	6	1		6
S2 L	oczekiwania	2	2	2	2		2	4	14	2		2
	odstępu			3	4		3	9	7			7

* - „ustąp pierwszeństwa przejazdu" – A7; „STOP" – B20; „zielona strzałka w lewo" S2 L; „zielona strzałka w prawo" S2 P

Źródło: Opracowanie własne.

Tablica 2 przedstawia zweryfikowane hipotezy (liczbę pomyślnych weryfikacji) odnośnie do zgodności rozkładów empirycznych z rozkładami teoretycznymi bez uwzględnienia organizacji ruchu na wlocie podporządkowanym.

Tablica 2

Rozkład czasu	Poissona	Chi-square	Erlanga	EXP	Fishera	Gamma	Log-normal	Normal	Triang.	Uniform	Weibulla
oczekiwania	7	11	4	14		3	25	35	3	3	13
odstępu		1	9	24		10	42	21	1		17

Źródło: Opracowanie własne.

Znajomość typu rozkładu teoretycznego związanego z danym procesem stochastycznym powinna się wiązać również z określeniem parametru(ów) takiego rozkładu. Poniżej w tablicy 3 podano średnie wartości poszczególnych parametrów rozkładów określonych podczas badań.

Tablica 3

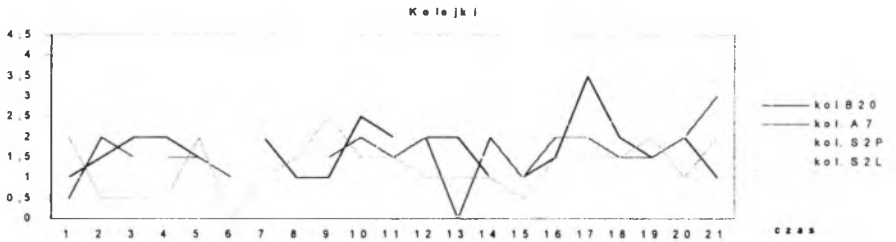
Okres pomiarowy	Kolejka – wartość średnia [poj] (po zaokrągleniu)	Czas oczekiwania wartość średnia [s]	Odstęp czasu – wartość średnia [s]
B 20	**2**	**6,12**	**58,1**
06.30-08.30	2	6,07	58,9
09.30-12.30	2	5,64	54,3
13.30-17.00	2	6,64	52,3
A 7	**2**	**9,55**	**63**
06.30-08.30	1	9,64	59,6
09.30-12.30	2	8,21	78,4
13.30-17.00	2	10,8	50,9
S2 P	**2**	**14**	**82**
06.30-08.30	1	11,5	74
09.30-12.30	2	16,4	102
13.30-17.00	3	14,2	69
S2 L	**1**	**11**	**80**
06.30-08.30	1	7,3	100
09.30-12.30	1	15,1	79
13.30-17.00	1	10,7	60

Źródło: Opracowanie własne.

Na rysunkach 2, 3 i 4 przedstawiono wykresy parametrów badanych rozkładów w funkcji czasu.

Rys. 2. Czas oczekiwania na wlocie w zależności od organizacji ruchu i pory dnia
Fig. 2. Time of expectation on inflow in dependences from traffic organization and times of day

Rys. 3. Odstęp czasu pomiędzy pojazdami na wlocie w zależności od organizacji ruchu i pory dnia
Fig. 3. Distance of time between vehicles on inflow in dependences from traffic organization and times of day



Rys. 4. Rozmiar kolejki na wlocie w zależności od organizacji ruchu i pory dnia
Fig. 4. Size of queue on inflow in dependences from traffic organization and times of day

Pomiary wykonano również dla strumienia ruchu nadrzędnego (uprzywilejowanego) odnośnie do 54 obiektów, w analogicznych przedziałach czasowych, gdzie badano lukę pomiędzy dwoma pojazdami w strumieniu nadrzędnym, którą mógłby wykorzystać pojazd włączający się do ruchu z wlotu podporządkowanego. Badania przeprowadzono dla dróg jednokierunkowych i dwukierunkowych. Tablica 4 przedstawia zweryfikowane hipotezy (liczbę pomyślnych weryfikacji) odnośnie do zgodności rozkładów empirycznych z rozkładami teoretycznymi tej luki.

Tablica 4

Rozkład czasu	Poissona	Chi-square	Erlanga	EXP	Fishera	Gamma	Log-normal	Normal.	Triang.	Uniform	Weibulla
Droga jedno-kierunkowa			3	6		1	10				5
Droga dwu-kierunkowa				9	1	3	8				

Źródło: Opracowanie własne.

W tablicy 5 przedstawiono średnią długość luki krytycznej w strumieniu ruchu uprzywilejowanego w rozbiciu na poszczególne okresy pomiarowe.

Tablica 5

Organizacja ruchu	6.30-8.30	9.30-12.30	13.30-17.00	Średnia
Droga jednokierunkowa	29,15	13,84	11,68	18,22
Droga dwukierunkowa	14,29	7,21	6,96	9,49

Źródło: Opracowanie własne.

3. ANALIZA WYNIKÓW

Weryfikacja hipotez statystycznych dotyczących empirycznego rozkładu, zarówno czasu oczekiwania, jak również odstępu pomiędzy pojazdami w strumieniach podporządkowanych, nie przyniosła zaskakujących rezultatów. W obu przypadkach rozkłady te zostały zweryfikowane, na poziomie istotności α=0.05, jako rozkłady logarytmiczno-normalne bądź normalne. Przy czym rozkład odstępów między pojazdami został zweryfikowany jako rozkład logarytmiczno-normalny, natomiast rozkład czasu oczekiwania został zweryfikowany jako zgodny z normalnym, w jednym przypadku jako logarytmiczno-normalny. Zwraca uwagę, co było do przewidzenia, wysoki wskaźnik weryfikacji hipotez, odnośnie do odstępów między pojazdami, jako rozkładu zgodnego z rozkładem przesuniętym wykładniczym (tablice 1 i 2). Przeprowadzone badania wykazały, że sposób organizacji ruchu na wlocie podporządkowanym nie ma *istotnego* wpływu na typ rozkładu generowanego na tym wlocie, zarówno jeżeli chodzi o czas oczekiwania, jak i odstępy czasu między pojazdami. Średni czas oczekiwania na włączenie się do ruchu z wlotu podporządkowanego oscyluje w granicach od 6 do 14 sekund w zależności od organizacji ruchu i rośnie wraz ze wzrostem natężenia ruchu. Zwraca uwagę wysoka wartość tego parametru dla organizacji ruchu za pomocą znaku A7, w stosunku do organizacji ruchu za pomocą znaku B20. Jest to jednak podyktowane faktem nagminnego łamania przez kierowców bezwzględnego nakazu zatrzymania się na linii „stop", przy znaku B20 (prowadzone były pod tym kątem osobne badania). Średnia kolejka pojazdów na wlocie podporządkowanym, bez względu na organizację ruchu, nie przekracza trzech samochodów, przy czym z reguły większa kolejka, co było do przewidzenia, utrzymuje się na wlotach o organizacji ruchu za pomocą znaku B20. Średnie odstępy czasu między pojazdami na wlotach podporządkowanych wahają się w granicach od 55 do 80 s, przy czym odstępy te maleją w miarę wzrostu natężenia ruchu. Reasumując, w modelach symulacyjnych można pominąć sposób organizacji ruchu na wlocie podporządkowanym bez istotnego wpływu na otrzymywane wyniki.

Poniżej przedstawiono proponowane rozkłady i ich parametry do wykorzystania w modelach symulacyjnych:

- czas oczekiwania na wlocie podporządkowanym, rozkład normalny, o średniej z przedziału 6-14 s, odchylenie standardowe należy przyjąć w zależności od średniej tak, aby max. czas oczekiwania nie przekroczył najwyższej zaobserwowanej wartości 45 s,

- odstęp czasu pomiędzy pojazdami na wlocie podporządkowanym, rozkład logarytmiczno-normalny, o średniej z przedziału 55–80 s, odchylenie standardowe należy dobrać tak, aby min. odstęp czasowy nie był mniejszy od 1÷2 s, a maksymalny większy od 213 s (wartości zaobserwowane). W przypadku rozkładu przesuniętego wykładniczego należy stosować podobne ograniczenia.

Proponowane rozkłady i ich parametry odnośnie do symulacji procesów na wlotach podporządkowanych zestawiono w tablicy 6.

Tablica 6

Rozkład	Czas oczekiwania	Odstęp czasowy
logarytmiczno-normalny	-	m=55-80 s $x \in (1,213)$
normalny	m=6..14s $x \in (0,45)$	-
przesunięty wykładniczy	-	m=55-80 s $x \in (1,213)$

Źródło: Opracowanie własne.

Przeprowadzone badania odnośnie do luki na drodze uprzywilejowanej, zarówno jedno-, jak i dwukierunkowej wykazały co następuje. Obrazem rozkładu luk pomiędzy pojazdami na drodze nadrzędnej jest rozkład logarytmiczno-normalny bądź rozkład wykładniczy przesunięty. Wyniki wskazują na fakt istnienia mniejszej średniej luki na drodze dwukierunkowej w stosunku do luki występującej na drodze jednokierunkowej. Stosunek średniej luki na drodze jednokierunkowej do luki na drodze dwukierunkowej ma się jak 2:1 (18,22:9,49). Najmniejsza średnia luka odnotowana na drodze jednokierunkowej i dwukierunkowej to odpowiednio 7,69 s i 3,96 s. Wyniki dotyczące luki w strumieniu nadrzędnym pokrywają się z danymi odnośnie do granicznych odstępów czasu *tg*[s] zamieszczonymi w pracy [1]. W pracy tej podano, w zależności od organizacji ruchu na wlocie podporządkowanym i relacji ruchu, zakres zmienności *tg* od 4,8 do 6,5 s.

4. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły dotychczasową bazę wiedzy odnośnie do charakterystyk stochastycznych strumieni ruchu podporządkowanego i nadrzędnego na skrzyżowaniach drogowych [1]. Oznacza to, że w modelach symulacyjnych czas oczekiwania na wlocie podporządkowanym należy symulować za pomocą rozkładu normalnego bądź wykładniczego przesuniętego. Odstępy czasu pomiędzy zgłoszeniami pojazdów na wlotach podporządkowanych należy symulować z wykorzystaniem rozkładu logarytmiczno-normalnego. Luka pomiędzy pojazdami w strumieniu uprzywilejowanym z kolei powinna być symulowana za pomocą rozkładu logarytmiczno-normalnego ewentualnie przesuniętego wykładniczego. W ramach przeprowadzonych badań stwierdzono pewne anomalie, jak chociażby dłuższy średni czas oczekiwania przed znakiem A7 aniżeli przed znakiem B20. Wynika to jednak w głównej mierze ze specyfiki wybranych obiektów, jak również nagminnego łamania przepisów „Prawa o ruchu drogowym".

Literatura

1. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKiŁ, Warszawa 1999.
2. Martin F.F.: Wstęp do modelowania cyfrowego. PWN, Warszawa 1976.
3. Ewans G.W., Wallace G. F., Sutherland G.L.: Symulacja na maszynach cyfrowych. WNT, Warszawa 1973.
4. Nievergelt J., Farrar C.J., Reingold E.M.: Informatyczne rozwiązywanie zadań matematycznych. PWN, Warszawa 1978.
5. Wińkowski J.: Programowanie symulacji procesów. PWN, Warszawa 1974.
6. Praca zespołowa: Laboratorium statystyki systemów i procesów transportowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 1997.
7. Komar Z., Wołek Cz.: Inżynieria ruchu drogowego - wybrane zagadnienia. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
8. Krystek R. i inni: Symulacja ruchu potoków pojazdów - wybrane zagadnienia. WKiŁ, Warszawa 1980.
9. Highway Capacity Manual. Transportation Research Board Special Report 209. Washington, D.C. 1994.

Recenzent: Doc. dr inż. Z.Ginalski

Abstract

Results of researches relating stochastic characterizations of traffic streams, subordinated and privileged, on road junction, has been presented in this article. Results one analysed under executioner of organization of traffic on subordinated inflow and times of day. One passed also researches for streams of superior traffic. For every streams one represended statistical distribution and parameters. Time expectations in subordinated strem is peaceable with normal distribution and distances of time with lognormal distribution. Gap in superior stream is peaceable with lognormal distribution.

Prace wykonano w ramach BW – 429/RM10/2001