ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2005
Seria: TRANSPORT z. 58 Nr kol.1688

Elżbieta MACIOSZEK[1]

CHARAKTERYSTYKA RUCHU NA MAŁYCH RONDACH W ASPEKCIE SYSTEMU MASOWEJ OBSŁUGI

Streszczenie. W artykule przedstawiono przykładowe podawane w literaturze przedmiotu modele kolejkowe dla dwóch potoków ruchu (potoku nadrzędnego i podrzędnego) oraz zaprezentowano analizę wyników pomiarów odstępów czasu pomiędzy nadjeżdżającymi pojazdami na wloty małych rond.

TRAFFIC ON SMALL ROUNDABOUTS IN ASPECT QUEUING SYSTEM

Summary. All metods of traffic analysis for unsignalized intersection and small roundabouts are derived from a simple queuing model in wchich the crossing of two traffic streams is considered. The basic queuing system with two traffic streams at unsignalized intersections has been presented in the article. The analysis of measurements headways between vehicles on minor stream at small roundabouts has been presented in the article.

1. WPROWADZENIE

Z teorii masowej obsługi można korzystać przy badaniu i rozwiązywaniu bardzo dużej liczby zagadnień występujących w różnorodnych dziedzinach przyrodoznawstwa, techniki, ekonomii, zarządzania itp. Stale pojawiają się nowe możliwości zastosowania teorii obsługi masowej, która jako dziedzina nauki liczy sobie niemal wiek i wciąż jest rozwijana. Celem teorii kolejek (teorii masowej obsługi) jest dostarczenie matematycznego opisu procesu prowadzącego do tworzenia się kolejek w systemie oraz scharakteryzowanie i szczegółowa analiza ich obsługi [1].

Teoria kolejek jako dział teorii masowej obsługi zajmuje się badaniem modeli matematycznych systemów, w których w chwilach losowych pojawiają się zewnętrzne lub wewnętrzne zgłoszenia, wymagające na ogół losowej długości obsługi przez kanał obsługi. W ruchu drogowym modele teorii kolejek są wykorzystywane do opisu sposobu obsługi pojazdów przez urządzenia komunikacyjne. Cały taki proces ma charakter probabilistyczny, czyli zarówno odstępy czasu pomiędzy kolejnymi zgłoszeniami się pojazdów jak również czasy obsługi są zmiennymi losowymi.

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

W celu określenia typu systemu ze względu na jego podstawowe charakterystyki należy zastosować powszechnie przyjętą symbolikę, którą wprowadził angielski badacz tej dziedziny D.G. Kendall. W jego klasyfikacji systemy odróżnia się według trzech głównych cech:
- typu procesu stochastycznego opisującego zgłoszenia klientów do obsługi,
- rozkładu długości czasu trwania obsługi,
- liczby kanałów obsługi będących do dyspozycji klientów.

Informacja o tych trzech charakterystykach jest zakodowana w symbolu postaci: *X/Y/n/m*, gdzie:
- n jest liczbą naturalną (lub symbolem ∞), oznaczającą liczbę kanałów obsługi w systemie;
- m jest liczbą miejsc w poczekalni (największa dopuszczalna długość kolejki). Wartość m=0 charakteryzuje system ze stratami, $0 < m < \infty$ określa system kombinowany z oczekiwaniem i stratami, natomiast $m = \infty$ to system z oczekiwaniem, posiadający nieskończenie wielką poczekalnię. W tym ostatnim przypadku opuszcza się część symboliki „∞", zatem symbole X/Y/c i X/Y/c/m są sobie równoważne;
- zamiast X i Y podstawia się jedną z liter M, D, G, E_l, C_n lub zamiast X parę liter GI. Dokładne oznaczenia symboliki Kendalla wyjaśnia tabl. 1.

Tablica 1

Symbolika według D. G. Kendalla

Litera	Oznacza na miejscu	
	X	Y
M	poissonowski proces zgłoszeń, tj. wykładniczy rozkład (wzajemnie niezależnych) odstępów między zgłoszeniami	wykładniczy rozkład czasu obsługi
E_l	rozkład Erlanga odstępów między zgłoszeniami (z parametrami λ i l)	rozkład Erlanga czasu obsługi (z parametrami μ i l)
C_n	rozkład χ^2 odstępów między zgłoszeniami (z n stopniami swobody)	rozkład χ^2 czasu obsługi
D	regularne zgłoszenia deterministyczne	stały czas obsługi
G	przypadek ogólny, brak jakichkolwiek założeń o procesie zgłoszeń	dowolny rozkład czasu obsługi
GI	rekurentny proces zgłoszeń	-

Źródło: [13, str. 61].

Obecnie w literaturze można znaleźć jeszcze wiele innych bardzo rozbudowanych opisów systemów masowej obsługi, np.: [13], [11].

2. PODSTAWOWY MODEL KOLEJKOWY DLA DWÓCH POTOKÓW RUCHU (NADRZĘDNEGO I PODRZĘDNEGO)

Metody analiz ruchu dla skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej jak i dla rond wywodzą się z prostego modelu kolejkowego zakładającego przecinanie się dwóch potoków ruchu, potoku nadrzędnego o natężeniu q_p [P/h] z potokiem podrzędnym (ustępującym pierwszeństwa potokowi nadrzędnemu) o natężeniu q_n [P/h]. Pojazdy nadrzędne mogą przejechać obszar kolizyjny bez ponoszenia strat czasu. Pojazdy podporządkowane mogą wjechać w obszar kolizyjny skrzyżowania tylko wtedy, gdy następny pojazd z potoku nadrzędnego jest w odległości większej niż t_c [s] (t_c – luka krytyczna), w przeciwnym razie muszą czekać na

taką możliwość (rys. 1). Poza tym pojazdy z podporządkowanych wlotów mogą wjechać w obszar kolizyjny skrzyżowania t_f sekund po odjeździe poprzedniego pojazdu z wlotu (t_f – tzw.follow - up time). Przedstawiony poniżej model dla dwóch przecinających się potoków ruchu zaczerpnięto z [10].

Niech $g(t)$ oznacza liczbę pojazdów na wlocie podporządkowanym, które mogą włączyć się do potoku nadrzędnego wykorzystując dostępne luki czasu o wielkości t. Oczekiwana liczba t-luk czasu w okresie jednej godziny wynosi $3600q_p f(t)$, gdzie:

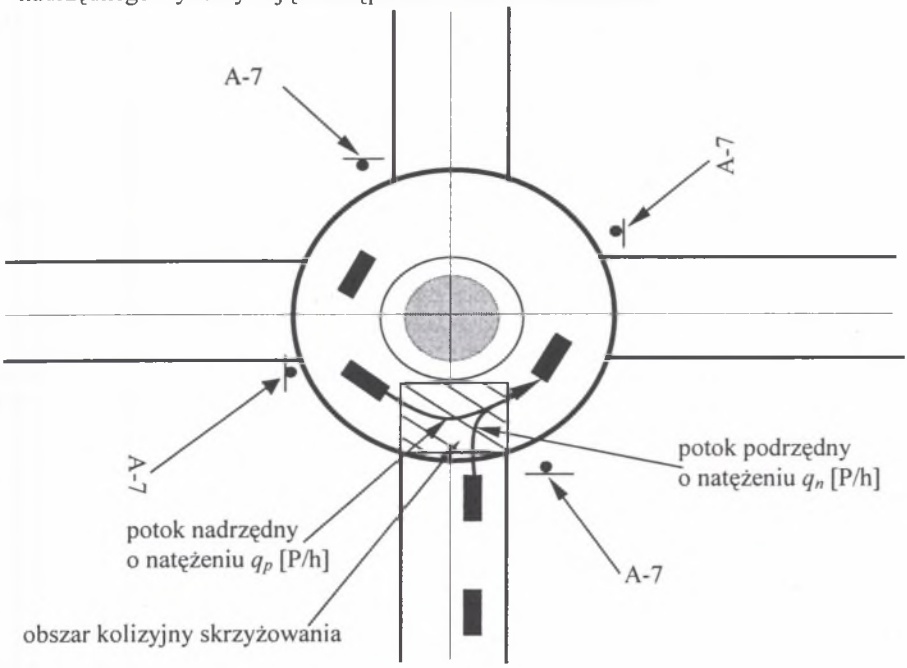
- $f(t)$ – funkcja gęstości luk czasu dla potoku głównego,
- q_p – natężenie potoku głównego.

Stąd przepustowość potoku podporządkowanego jest zapewniona przez t-luk czasu pomiędzy pojazdami na drodze głównej w jednej godzinie i wynosi $3600q_p f(t)g(t)$. Chcąc obliczyć całkowitą przepustowość wyrażoną w P/s należy wziąć pod uwagę całkowity zakres luk czasu w potoku głównym:

$$q_m = q_p \int_0^{\infty} f(t) \cdot g(t) dt \,, \tag{1}$$

gdzie:

- q_m - przepustowość wlotu podporządkowanego, [P/s],
- q_p - natężenie potoku nadrzędnego, [P/s],
- $f(t)$ - funkcja gęstości rozkładu luk czasu w potoku głównym,
- $g(t)$ - liczba pojazdów na wlocie podporządkowanym, które mogą włączyć się do potoku nadrzędnego wykorzystując dostępne luki czasu o wielkości t.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie obszaru kolizyjnego dla skrzyżowań typu małe rondo
Fig. 1. Illustration of the queuing system for small roundabouts

Źródło: opracowanie własne na podstawie [10, str. 13]

Bazując na modelu akceptacji luk czasu przepustowość modelu z dwoma potokami ruchu można oceniać za pomocą teorii prawdopodobieństwa, przy następujących założeniach:
a) t_c i t_f są wielkościami stałymi dla wszystkich kierowców,
b) odstępy czasu pomiędzy pojazdami na jezdni głównej mają rozkład wykładniczy,
c) stałe natężenie ruchu dla obydwu potoków.

Upraszczające założenia (a), (b), (c) nie odzwierciedlają rzeczywistości, dlatego w literaturze można spotkać liczne próby rezygnacji z któregoś z założeń lub przyjęcia nowych założeń, np. Siegloch (1973) rozważał rożne typy rozkładów luk czasu w potoku nadrzędnym bazując na metodach analitycznych. Podobne badania prowadzili Catchpole i Plank (1986) oraz Troutbeck (1986). Wzory na przepustowość wlotów podporządkowanych próbowano także znaleźć poprzez symulacje zachowania się potoków ruchu np. Grossman (1991) badał rozkłady luk czasu w potoku nadrzędnym za pomocą symulacji.

Do rozwiązania problemu akceptacji luk a zarazem do oceny wyznaczników jakości funkcjonowania skrzyżowania można użyć dwóch narzędzi: teorii kolejek oraz symulacji.

Wiele spośród spotykanych modeli ruchu zbudowano na założeniu, że system składający się z dwóch potoków ruchu, nadrzędnego i podrzędnego (rys. 1) można przedstawić za pomocą modelu kolejkowego M/G/1. W systemie tym pojazdy na wlocie podporządkowanym zgłaszają się losowo, a czas obsługi rozumiany jest jako czas, w którym pojazd pozostawał na pierwszym miejscu w kolejce na wlocie. Czas obsługi pojazdu kontrolowany jest przez potok na drodze głównej. Dla systemu M/G/1 ogólny wzór Pollaczka - Chinczyna na średnie straty czasu pojazdów w kolejce ma postać:

$$D_q = \frac{xW\left(1+C_w^2\right)}{2(1-x)}, \tag{2}$$

gdzie: x - stopień nasycenia ($x = \frac{q_n}{q_m}$),

q_n - natężenie na wlocie podporządkowanym,

q_m - przepustowość wlotu podporządkowanego),

W - średni czas obsługi. Jest to średni czas jaki pojazd na wlocie podporządkowanym spędza na pierwszym miejscu w kolejce,

$C_w = \frac{\sqrt{Var(W)}}{W}$ - współczynnik wariancji czasu obsługi,

$Var(W)$ - wariancja czasu obsługi.

Stąd całkowite średnie straty czasu dla pojazdów z wlotu podporządkowanego wynoszą $D = D_q + W$. Wychodząc z równania na przepustowość wlotu podporządkowanego i włączając czas obsługi do całkowitych strat czasu otrzymamy:

$$D = \frac{1}{q_m}\left(1+\frac{x}{1-x}C\right), \tag{3}$$

gdzie $C = \frac{1+C_w^2}{2}$, najczęściej $C = 1.0$.

Systemy kolejkowe nie odzwierciedlają dokładnej sytuacji na skrzyżowaniach, są jedynie modelami szacunkowymi. Skrajne przypadki systemu M/G/1 to:

- system M/D/1, stały czas obsługi występuje wtedy, gdy wszystkie pojazdy spędzają taką samą wartość czasu na pierwszej pozycji w kolejce na wlocie, co z matematycznego punktu widzenia powoduje: $Var(W) = 0$, $C_w^2 = 0$ i $C = 0.5$;
- system M/M/1, losowa wartość czasu obsługi, czyli czas, jaki pojazdy spędzają na pierwszej pozycji w kolejce na wlocie, ma rozkład wykładniczy, co z matematycznego punktu widzenia powoduje: $Var(W) = E(W)$, $C_w^2 = 1$ i $C = 1.0$.

Dla systemu M/G/1 prawdopodobieństwo p_o, że na wlocie nie występuje kolejka pojazdów (tzw. system pusty), jest dane jako:

$$p_0 = 1 - x \tag{4}$$

W literaturze spotyka się także modele typu M/G2/1. Tego typu systemy były już wielokrotnie rozpatrywane między innymi przez Kremsera (1962, 1964), Tannera (1962), oraz Yeo i Weesakula (1964). W systemie M/G2/1 rozkład czasu obsługi jest opisany dla dwóch przypadków:

- W_1 - czas obsługi dla pojazdów, które po przyjeździe na wlot nie zastały żadnego pojazdu w kolejce, tzw. system pusty,
- W_2 - czas obsługi dla pojazdów, które po przyjeździe na wlot przyłączają się na koniec kolejki oczekujących na obsługę pojazdów.

W obydwu przypadkach czas obsługi pojazdu rozumiany jest jako czas, jaki pojazd spędza na pierwszej pozycji na wlocie. Średni czas, jaki pojazd spędza w kolejce na wlocie w systemie M/G2/1, wynosi (według Yeo, 1962):

$$D_q = \frac{q_n}{2} \cdot \left(\frac{E(W_1^2) - E(W_2^2)}{v} + \frac{E(W_2^2)}{y} \right), \tag{5}$$

gdzie:

D_q - średnie straty czasu pojazdów w kolejce na pozycji większej niż pierwsza,
$E(W_1)$ - wartość oczekiwana z W_1,
$E(W_1^2)$ - wartość oczekiwana z $(W_1 \cdot W_1)$,
$E(W_2)$ - wartość oczekiwana z W_2,
$E(W_2^2)$ - wartość oczekiwana z $(W_2 \cdot W_2)$,
$v = y + z$,
$y = 1 - q_n \cdot E(W_2)$,
$z = q_n \cdot E(W_1)$,

Prawdopodobieństwo p_o, że na wlocie nie występuje kolejka pojazdów (system pusty), jest dane jako:

$$p_0 = \frac{y}{v} \tag{6}$$

Jeżeli do całkowitych strat czasu wliczymy czas obsługi, czyli czas, jaki pojazd spędza w pierwszej pozycji na wlocie, otrzymamy:

$$D = \frac{E(W_1^2)}{v} + \frac{q_n}{2} \cdot \left(\frac{y \cdot E(W_1^2) + z \cdot E(W_2^2)}{v \cdot y} \right) \tag{7}$$

Wzory na wartości oczekiwane W_1 i W_2 rozwinął Brilon (1988) za Kremserem (1962). Kremser (1964) wykazał, że ważność wzorów na wartości oczekiwane W_1 i W_2 jest ograniczona do przypadku $t_c = t_f$, co jest nierealne w rzeczywistości. Daganzo (1977) podał ulepszone wzory na $E(W_2)$ i $E(W_2^2)$, które później rozważał Poeschl (1983). Wzory Poeschla nie wymagały już założenia: $t_c = t_f$. Pomimo dobrego szacowania wartości t_c i t_f, wzory te jednak są zbyt skomplikowane do stosowania ich w praktyce, można je natomiast wykorzystywać w aplikacjach komputerowych. Poza tym wzory te są ważne jedynie przy znacznych założeniach upraszczających (a), (b), (c) podanych na początku, co oznacza, że mogą być rozpatrywane tylko w stanie stacjonarnym dla warunków nienasycenia ruchem.

3. ROZWIĄZANIA ZALEŻNE OD CZASU

Teoriokolejkowe modele w stanie stacjonarnym mogą być stosowane i dają użyteczne rozwiązania tylko wtedy, gdy czas obserwacji jest znacznie większy niż wyrażenie z prawej strony nierówności (Troutbeck za Morse'em 1962), [10, str. 25]:

$$T > \frac{1}{\left(\sqrt{q_m} - \sqrt{q_n}\right)^2}, \tag{8}$$

gdzie T - czas obserwacji.

Powyższa nierówność ma zastosowanie jedynie wtedy, gdy q_m i q_n są niemalże stałe w okresie T. W przypadku gdy nierówność (8) nie jest spełniona, należy zastosować modele zależne od czasu. Pierwsze matematyczne modele zależne od czasu rozwinął Newell (1982) bazując na pracach Kimbera i Hollisa (z 1979 r.) oraz na pracy Whitinga, która nigdy nie została opublikowana. W czasie godzin szczytu natężenie ruchu jest znacznie większe niż w pozostałych okresach doby, w skrajnych przypadkach może nawet przekraczać przepustowość. Dla godziny szczytu średnie straty czasu można obliczać z następującego równania Troutbecka [10, str. 26]:

$$\begin{gathered}
D = D_1 + E + \frac{1}{q_m} \quad [s] \\
D_1 = \frac{1}{2}\left(\sqrt{F^2 + G - F}\right) \quad [s] \\
F = \frac{1}{q_{m0} - q_{n0}}\left[\frac{T}{2}(q_m - q_n)y + C\left(y + \frac{h}{q_m}\right)\right] + E \\
G = \frac{2Ty}{q_{m0} - q_{n0}}\left[C\frac{q_n}{q_m} - (q_m - q_n)E\right] \\
E = \frac{Cq_{n0}}{q_{m0}(q_{m0} - q_{n0})} \\
h = q_m - q_{m0} + q_{n0} \\
y = 1 - \frac{h}{q_n},
\end{gathered} \tag{9}$$

gdzie: q_m - przepustowość wlotu na skrzyżowanie w godzinie szczytu T, [P/s],
q_{m0} - przepustowość wlotu na skrzyżowanie w okresie pozaszczytowym [P/s],
q_n - natężenie ruchu na wlocie podporządkowanym w godzinie szczytu T, [P/h],
q_{n0} - natężenie ruchu na wlocie podporządkowanym w okresie pozaszczytowym [P/s],
C - współczynnik, $C = 1$ dla skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej, (Kimber i Hollis, 1979).

Powyższe wzory zostały zweryfikowane i udowodniono, że dają dobre przybliżenia wartości strat czasu ponoszonych przez pojazdy w tymczasowych warunkach nasycenia ruchem, jakim są godziny szczytu. Wzór Akcelika na średnie straty czasu pojazdów na wlocie podporządkowanym w warunkach niestacjonarnych ma postać [10, str. 28]:

$$D - D_{\min} = \frac{1}{2}\cdot\frac{L_0}{q_m} + \frac{(x-1)T}{4} + \sqrt{\left[\frac{L_0}{2q_m} + \frac{(x-1)T}{4}\right]^2 + \frac{TD_{\min}(\varepsilon x + \gamma)}{2}} \tag{10}$$

Wstawiając do równania (10) $\varepsilon = 1$, $\gamma = 0$, $D_{\min} = \frac{1}{q_m}$, otrzymujemy równanie na straty czasu pojazdów na wlocie podporządkowanym podobne do równania w modelu M/M/1 (Akcelik) [10, str. 28]:

$$D = \frac{1}{q_m} + \frac{T}{4}\left\{(x-1) + \sqrt{(x-1)^2 + \frac{8x}{q_m T}}\right\} \tag{11}$$

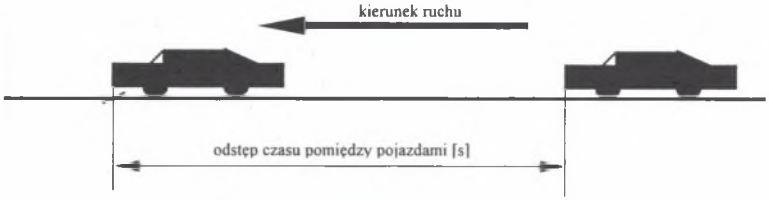
Wartości średnich strat czasu z równania (10) są zależne od początkowej długości kolejki pojazdów na wlocie, czasu, w którym występuje kolejka, stopnia nasycenia wlotu oraz współczynników ze wzoru na straty czasu w stanie stacjonarnym (γ, ε). Równanie to może być stosowane do określania średnich strat czasu pojazdów na wlocie podporządkowanym w warunkach niestacjonarnych (w godzinach szczytu) dla różnej wartości początkowej długości kolejki.

4. ANALIZA STRUMIENI RUCHU DROGOWEGO NA WLOTACH MAŁYCH ROND

W celu określenia własności strumieni ruchu drogowego na wlotach małych rond przeprowadzono analizę strumieni dopływających na wloty pojazdów na podstawie pomierzonych ręcznie za pomocą stopera odstępów czasu pomiędzy nadjeżdżającymi pojazdami. Pomiary dokonano na 2 małych rondach zlokalizowanych na Górnym Śląsku. Były to:

- małe rondo ulic: Świerczewskiego, Michałkowickiej, Świerczewskiego, Parkowej w Siemianowicach Śląskich,
- małe rondo ulic: Artura, Nałkowskiej, Kużaja, Sikorskiego w Radzionkowie k/Bytomia.

Odstępy pomiędzy pojazdami mierzono między tymi samymi punktami pojazdów, tzn. pomiędzy przodami kolejnych pojazdów przez dwa losowo wybrane dni na każdym małym rondzie. Na rysunku 2 schematycznie przedstawiono definicję odstępu czasu pomiędzy pojazdami zgłaszającymi się na wlocie małego ronda.



Rys. 2. Definicja odstępu czasu pomiędzy kolejnymi pojazdami zgłaszającymi się na wloty małych rond

Fig. 2. Illustration of headway between minor stream vehicles at small roundabout

Źródło: opracowanie własne

Minimalny odstęp (Δ [s]) jest to najmniejszy z zaobserwowanych odstępów pomiędzy dwoma kolejnymi pojazdami. Wartość odstępu czasu zależy od grupy rodzajowej pojazdu (SO, SD, SC, SCP, A, AP, R/M).

Odstępy czasowe analizowano oddzielnie dla każdego wlotu, wszystkie wloty posiadały po jednym pasie ruchu. Odstępy pomiędzy pojazdami notowano w piętnastominutowych interwałach czasowych, następnie określono rozkłady prawdopodobieństwa dla odstępów czasowych w charakterystycznych przedziałach godzinowych takich, jak:

- godzina szczytu porannego,
- godzina szczytu południowego,
- przeciętna godzina pozaszczytowa,
- najmniej obciążona godzina w całym okresie pomiarowym.

Weryfikacja statystyczna polegała na określaniu zgodności rozkładu empirycznego z próby z rozkładem hipotetycznym. Dokonano jej w programie Statgraphics wykorzystując testy Chi - kwadrat i Lambda - Kołmogorowa. Przyjęto poziom istotności 0,05. W przypadku gdy obliczony poziom istotności był mniejszy od 0,05, to hipotezę zerową odrzucano, w przeciwnym przypadku hipotezę zerową przyjmowano. Zaobserwowane wartości odstępów czasu różnią się od siebie znacznie, a ich wielkości zależą od natężenia ruchu oraz panujących warunków ruchu.

Według [12, str. 52] minimalny odstęp (Δ) określa przesunięcia histogramów i innych wykresów na osi poziomej, a charakterystyki rozkładów przesuniętych po uwzględnieniu wartości Δ są takie jak w rozkładach nie przesuniętych. Według [12, str. 52] przesunięcie Δ odniesione do wartości średniej można traktować jako wskaźnik równoodstępowości, czyli małej losowości potoku ruchu.

5. WYNIKI POMIARÓW I PODSUMOWANIE

Na podstawie pomiarów oszacowano, że minimalny odstęp dla samochodów osobowych zgłaszających się na wlotach małych rond wynosi Δ = 1s. Zakładając, że kolejny pojazd z potoku ruchu na wlocie podporządkowanym nie może wjechać w obszar wlotu po czasie mniejszym niż Δ [s] po poprzedzającym go pojeździe na wlocie podporządkowanym, każdy z otrzymanych rozkładów jest przesunięty o Δ = 1 s. W tablicach 2 i 3 zestawiono otrzymane wyniki weryfikacji statystycznej rozkładów odstępów czasu pomiędzy pojazdami zgłaszającymi się na wlotach małych rond. Na każdym z małych rond wyznaczono godzinę szczytu porannego i popołudniowego oraz najmniej obciążoną godzinę w czasie pomiarów. Przeciętną godzinę ruchu dla wszystkich wlotów na każdym małym rondzie wyznaczono na okres od 13.00-14.00. Na podstawie analiz i opracowań wyników można stwierdzić, że pora dnia ma pewien wpływ na rozkład odstępów czasu pomiędzy zgłaszającymi się na wlotach pojazdami. Można stwierdzić, że dla ruchu swobodnego występującego w okresach godzin pozaszczytowych jak i w najmniej obciążonych godzinach odstępy czasu mają przesunięty rozkład wykładniczy. Dla ruchu średnio intensywnego, jaki występuje w godzinach szczytu porannego, odstępy czasu mają przesunięty rozkład logarytmiczno-normalny lub przesunięty rozkład Erlanga, lub przesunięty rozkład wykładniczy. Dla ruchu intensywnego jaki występuje w godzinach szczytu popołudniowego, odstępy czasu mają przesunięty rozkład wykładniczy lub przesunięty rozkład Erlanga. Podczas weryfikacji hipotez zdarzały się też przypadki, że żadna z postawionych hipotez statystycznych nie została potwierdzona (przypadki [-] w tabl. 2 i 3).

W przyszłości planowane jest wykonanie pomiarów czasów obsługi pojazdów na małych rondach i próby opisu ruchu na tego typu skrzyżowaniach i ich wlotach dojazdowych za pomocą modelu teorii kolejek dla różnych okresów czasu takich, jak: godzina szczytu porannego i popołudniowego, najmniej obciążona godzina w czasie pomiarów oraz przeciętna godzina dla każdego z wlotów.

Tablica 2

Wyniki weryfikacji statystycznej rozkładów odstępów czasu pomiędzy pojazdami zgłaszającymi się na wlotach małych rond

Okres czasu	Małe rondo w Siemianowicach			
	Wlot 1	Wlot 2	Wlot 3	Wlot 4
Szczyt poranny	Q_1 = 87 [P/h]	Q_2 = 60 [P/h]	Q_3 = 72 [P/h]	Q_4 = 63 [P/h]
	przesunięty rozkład logarytmiczno-normalny	przesunięty rozkład Erlanga	przesunięty rozkład wykładniczy	przesunięty rozkład Erlanga
Szczyt popołudniowy	Q_1 = 87 [P/h]	Q_2 = 96 [P/h]	Q_3 = 74 [P/h]	Q_4 = 90 [P/h]
	przesunięty rozkład wykładniczy	przesunięty rozkład wykładniczy	-	przesunięty rozkład Erlanga
Najmniej obciążona godzina	Q_1 = 6 [P/h]	Q_2 = 15 [P/h]	Q_3 = 5 [P/h]	Q_4 = 3 [P/h]
	-	przesunięty rozkład wykładniczy	-	-
Godzina pozaszczytowa	Q_1 = 49 [P/h]	Q_2 = 47 [P/h]	Q_3 = 50 [P/h]	Q_4 = 39 [P/h]
	-	przesunięty rozkład wykładniczy	-	przesunięty rozkład wykładniczy

Źródło: opracowanie własne

Tablica 3

Wyniki weryfikacji statystycznej rozkładów odstępów czasu pomiędzy pojazdami zgłaszającymi się na wlotach małych rond

Okres czasu	Małe rondo w Radzionkowie			
	Wlot 1	Wlot 2	Wlot 3	Wlot 4
Szczyt poranny	Q_1 = 71 [P/h]	Q_2 = 57 [P/h]	Q_3 = 52 [P/h]	Q_4 = 41 [P/h]
	przesunięty rozkład Erlanga	przesunięty rozkład wykładniczy	-	przesunięty rozkład logarytmiczno-normalny
Szczyt popołudniowy	Q_1 = 55 [P/h]	Q_2 = 75 [P/h]	Q_3 = 70 [P/h]	Q_4 = 58 [P/h]
	-	przesunięty rozkład logarytmiczno-normalny	przesunięty rozkład wykładniczy	przesunięty rozkład Erlanga
Najmniej obciążona godzina	Q_1 = 7 [P/h]	Q_2 = 6 [P/h]	Q_3 = 0 [P/h]	Q_4 = 10 [P/h]
	przesunięty rozkład wykładniczy	-	-	-
Godzina pozaszczytowa	Q_1 = 33 [P/h]	Q_2 = 24 [P/h]	Q_3 = 25 [P/h]	Q_4 = 24 [P/h]
	przesunięty rozkład wykładniczy	-	-	przesunięty rozkład wykładniczy

Źródło: opracowanie własne

Literatura

1. Datka S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu. WKŁ, Warszawa 1999.
2. Drew D. R.: Traffic Flow Theory and Control. Mc Graw – Hill 1968. New York.
3. Heidemann D., Wegmann H.: Queueing at unsignalized intersections. Transportation Research Board. Vol. 31. No 3, pp. 239-263, 1997.
4. Kopiński M.: Matematyczne modele ruchu na wybranych skrzyżowaniach drogowych. Praca doktorska (fragmenty), Politechnika Wrocławska, Wrocław 1981.
5. Kopocińska I., Łukaszewicz J.: Teoria obsługi masowej. PWN, Warszawa 1971.
6. König D., Stoyan D.: Metody teorii obsługi masowej. WNT. Warszawa 1979.
7. Krasińska S., Morytko W., Szocińska E.: Wybrane zagadnienia probabilistyki. Politechnika Śląska, Gliwice 1993.
8. Mardoń L.: Rachunek probabilistyczny. Poradnik. Wydawnictwo MON, Warszawa 1973.
9. Plucińscy A., E.: Elementy probabilistyki. PWN, Warszawa 1979.
10. Troutbeck R. J., Brilon W.: Unsignalized Intersection Theory. Rozdział z książki: Traffic Flow Theory, Transportation Research Board, 1999. Weryfikacja monografii z 1964 r.
11. Wagner H. M.: Badania operacyjne. PWN, Warszawa 1980.
12. Woch J.: Statystyka procesów transportowych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej. Gliwice 2001.
13. Woch J.: Teoria potoków ruchu (w druku).
14. Woch J.: Nowe ujęcie przepustowości drogi z porównaniem modeli. Materiały I Konferencji Naukowo - Technicznej na temat: Systemy Transportowe, Teoria i praktyka. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2003, ss. 43 –72.