

Elżbieta MACIOSZEK<sup>1</sup>

## REPREZENTACJA CZASU W MODELU SYMULACYJNYM RUCHU POJAZDÓW NA MAŁYCH RONDACH I JEGO WŁOTACH DOJAZDOWYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metodologię obliczania czasu w komputerowym modelu symulacyjnym ruchu pojazdów na małych rondach i jego wlotach dojazdowych oraz wyniki pomiarów prędkości przejazdu pojazdu testowego wokół wyspy centralnej małego ronda, wyniki pomiarów czasów zjazdu z jezdni wokół wyspy centralnej małego ronda na obrany wylot oraz wyniki pomiarów akceptowanych przez kierowców odstępów czasu niezbędnych do wykonania manewru wjazdu na jezdnię małego ronda. Badania te posłużyły w budowie pewnego etapu omawianego modelu symulacyjnego.

## APPLICATION HELPING IN TRAFFIC ANALYSIS PROCESS FOR SMALL TRAFFIC CIRCLES AND THEIRS INLETS

**Summary.** The article deals with a computer traffic simulation model of small traffic circles and theirs inlets, and methodology of time calculation in the simulation model. The results of the speed measuring of a testing vehicle running around the central island of the small traffic circle, as well as results of the off-time measuring of that vehicle reaching the aim outlet have been also presented. These researches were used for creating some stage of this simulation model.

### 1. WPROWADZENIE

Doniosłą rolę w rozwoju metod estymacji przepustowości i warunków ruchu na skrzyżowaniach odegrały i odgrywają nadal badania na modelach ruchu, do nurtu których należą badania symulacyjne. Znaczenie symulacji ruchu rośnie wraz z osiąganiem kolejnych granic w coraz wierniejszym odwzorowywaniu i rozwiązywaniu złożonych procesów ruchu na skrzyżowaniach za pomocą modeli analitycznych. Trudne bądź niemożliwe do ujęcia w tych modelach zjawiska niestacjonarności i ograniczeń swobody ruchu, losowości procesu obsługi, zakłóceń ruchu wynikających z wzajemnych zależności podporządkowanych potoków ruchu oraz różne sposoby organizacji ruchu na wlotach można w dość prosty sposób uwzględnić w modelach symulacyjnych [5].

---

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

Symulacja jest to proces konstruowania w chronologicznym porządku opisów stanów tworzących historie stanów [5]. Taka metoda może być przeciwstawiona możliwości generowania informacji do historii stanów w porządku innym niż chronologiczny, a następnie składania lub organizowania tych informacji tak, aby utworzyć historię stanów.

Małe rondo są przydatną formą skrzyżowań zarówno w obszarze zabudowanym, jak i poza nim. Z jednej strony, sprzyjają płynnemu przepływowi ruchu, z drugiej zaś - wygodzie jazdy, dlatego w dużym stopniu przyczyniają się do podniesienia bezpieczeństwa na drogach. Budowany i opisywany w tym artykule model symulacyjny ruchu pojazdów na małych rondach i jego wlotach dojazdowych ma ułatwić analizę podstawowych parametrów ruchu, takich jak przepustowość, panujące warunki ruchu, czyli PSR (poziom swobody ruchu), wartości opóźnień na wlotach ponoszonych przez pojazdy, średni czas opóźnień, liczba pojazdów opóźnionych, prawdopodobieństwo opóźnienia oraz prawdopodobieństwo płynnego przejazdu przez małe rondo.

## 2. RUCH POJAZDÓW WOKÓŁ WYSPIY CENTRALNEJ MAŁEGO RONDA

Czas przejazdu pojazdu przez wszystkie przekroje modelu (tzw. czas obsługi w systemie) w całkowicie swobodnym ruchu, gdy ruch jest bez zakłóceń spowodowanych ruchem innych pojazdów, obliczany jest w modelu symulacyjnym jako suma następujących czasów:

$$t_p = t_1 + t_o + t_{ig} + t_{jr} + t_z \quad [s] \quad (1)$$

gdzie:

$t_p$  – całkowity czas przejazdu pojazdu przez wszystkie przekroje modelu: I, II, III, IV,

$t_1$  – czas dojazdu pojazdu od przekroju I do przekroju II,

$t_o$  – opóźnienie na wlocie liczone jako dodatkowy czas stracony przez pojazd na dojazd z przekroju I do przekroju II (czyli do linii podporządkowania wlotu),  $t_o=0$  lub  $t_o \neq 0$ ,

$t_{ig}$  – indywidualna dla każdego pojazdu wartość granicznego odstępu czasowego,

$t_{jr}$  – czas przejazdu pojazdu przez jezdnię wokół wyspy centralnej ronda,

$t_z$  – czas zjazdu pojazdu z jezdni wokół wyspy centralnej (1 s – 4 s).

### 2.1. Czas przejazdu pojazdu z przekroju I do przekroju II

Aby w programie możliwe było obliczenie tego czasu, należy podać długość drogi dojazdowej do ronda w [m]. Gdy nie znamy dokładnej wartości długości drogi, to przyjmujemy wartość szacunkową. Następnie należy podać prędkość, z jaką pojazd zbliża się do ronda. Za prędkość tę można przyjąć prędkość określoną znakami drogowymi umieszczonymi przed rondem. Gdy nie znamy prędkości, jaka obowiązuje przed analizowanym rondem, to automatycznie dobiera ją program w zależności od lokalizacji ronda i ustalonych prawnie wartości (zobacz tablica 1).

Tablica 1

Prędkość przy dojeździe do małego ronda

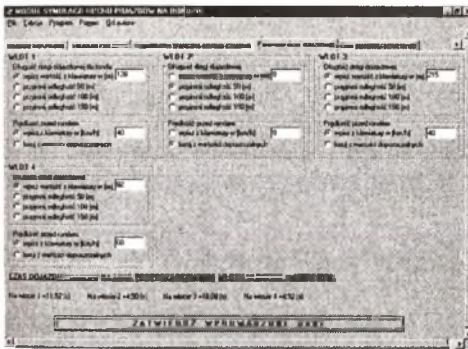
Na terenie zabudowy		Poza terenem zabudowy (w tym w strefach podmiejskich)
- gdy na ulicy przed rondem obowiązuje (z ustaleń przepisów ruchu drogowego) prędkość dopuszczalna 60 km/h, to należy wprowadzić ograniczenie prędkości przy dojeździe do	40 km/h	- zaleca się 50 km/h, - dopuszcza się 60 km/h
- gdy obowiązuje podwyższony limit prędkości do 70 km/h	50 km/h	

Źródło: [2].

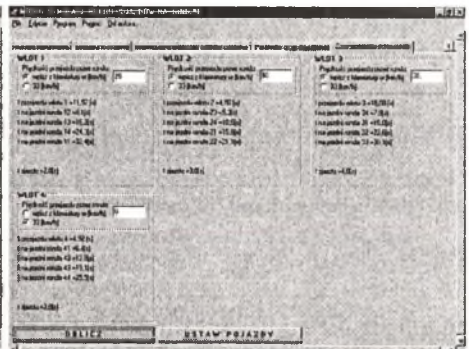
Program na podstawie wprowadzonych danych oblicza czas dojazdu na linię podporządkowania wlotu ze wzoru (2). Ponieważ droga podawana jest w [m], a prędkość w [km/h], to aby czas uzyskać w sekundach, to zgodnie z zasadami przeliczeń otrzymaną wartość należy pomnożyć przez 3.6. W zależności od otrzymanej wartości  $t_1$  program podaje wynik odpowiednio w sekundach, minutach, godzinach.

$$t_1 = \frac{s}{V} \left[ \frac{m}{km} \right] = \frac{s}{V} \cdot 3.6 \quad [s] \quad (2)$$

W celu obliczenia czasu przejazdu pojazdów z przekroju I (miejsca generowania pojazdów) do przekroju II (linia podporządkowania wlotu) należy dla każdego z wlotów podać parametry charakteryzujące drogę dojazdową (zobacz rysunek 1).



Rys. 1. Ustalenie parametrów drogi dojazdowej dla czterowlotowego małego ronda  
Fig. 1. Setting the approach road parameters for a small four-inlet traffic circle



Rys. 2. Wizualizacja sposobu obliczania czasu przejazdu przez małe czterowlotowe rondo w ruchu swobodnym (nie zakłóconym ruchem innych pojazdów)  
Fig. 2. Visualization of the program generating method for specific boundary values of time gaps for each vehicle being on the inlet

## 2.2. Opóźnienie na wlocie

W przypadku gdy na wlocie utworzyły się kolejki, do czasu  $t_1$  (czasu dojazdu z punktu wygenerowania pojazdu do linii podporządkowania wlotu) dodawane jest opóźnienie pojazdu wynikające z oczekiwania w kolejce na wlocie.

## 2.3. Indywidualna wartość granicznego odstępu czasowego

Każdemu pojazdowi jest na bieżąco przypisywana indywidualna wartość odstępu granicznego potrzebnego na włączenie się z wlotu podporządkowanego na jezdnię wokół wyspy centralnej małego ronda. Wartość ta zróżnicowana jest w zależności od rodzaju pojazdu (SOD, SC, SCP, A, AP, R/M) oraz wlotu, na którym zanotowano zgłoszenie. Czas ten generowany jest w modelu symulacyjnym według normalnego rozkładu prawdopodobieństwa, przesuniętego na dodatnie wartości układu współrzędnych i uciętego o brzegowe przypadki. Wizualizację sposobu generowania w programie indywidualnych wartości granicznych odstępu czasowego dla każdego z pojazdów na wlocie przedstawiono na rysunku 3.

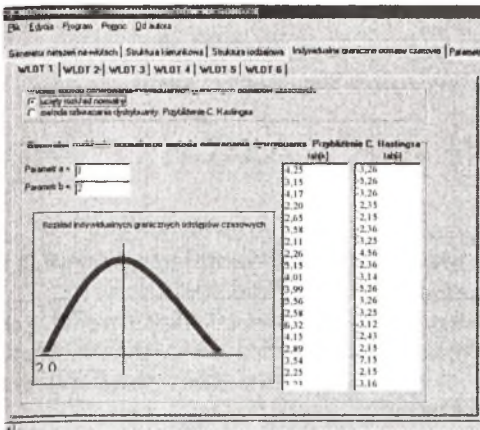
Istnieje również możliwość zadawania dla wszystkich pojazdów zgłaszających się na danym wlocie stałego odstępu granicznego. W tym przypadku każdy kierowca zgłaszający się na wlocie będzie akceptował odstęp czasu równy granicznemu lub większy. Testowe obliczenia symulacyjne wykażą wtedy wyniki obciążone pewnym błędem wynikającym z przyjęcia dla wszystkich pojazdów takiej samej wartości odstępu granicznego, co nie jest zgodne z rzeczywistością.

W rzeczywistości kierowca z wlotu podporządkowanego może wykorzystać tylko konkretną lukę, ale może także odrzucić jedną lub więcej luk. Kierowca, którego indywidualny odstęp graniczny jest dość duży, odrzuci większą liczbę luk niż kierowca, który będzie skłonny wykorzystać lukę krótszą. Poza tym istnieje większe prawdopodobieństwo, że kierowca z małym indywidualnym odstępem granicznym wykorzysta pierwszą napotkaną lukę, czyli lukę dyspozycyjną [4].

W modelu założono niezmiennie zachowanie się kierowcy na wlocie, czyli raz przypisany danemu kierowcy indywidualny graniczny odstęp czasu nie ulega już potem w trakcie cyklu symulacji zmianie w zależności od czasu oczekiwania na wlocie.

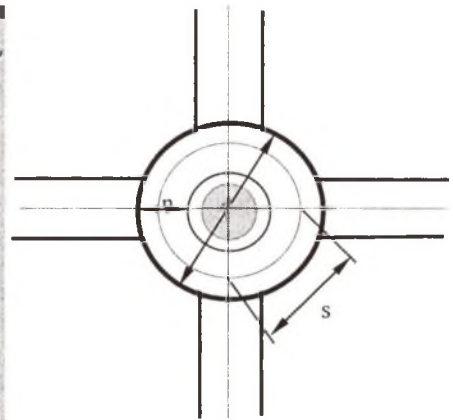
Pojazdy, które nie wykorzystały swojego odstępu, są zmuszone zatrzymać się na wlocie i oczekiwać na odstęp czasu w potoku na jezdni ronda równy jego indywidualnemu odstępowi granicznemu lub większy.

Na podstawie przeprowadzonych obserwacji i pomiarów akceptowanych przez kierowców na wlotach podporządkowanych odstępu czasu niezbędnych do wykonania manewru wjazdu na jezdnię wokół wyspy centralnej małego ronda na kilku małych rondach można stwierdzić, że odstępy czasu są losowe i zależą od szerokiej gamy predyspozycji każdego kierowcy oraz innych czynników losowych. Zauważono, że pojazdy nie zatrzymane na wlocie wykorzystują odstępy czasowe o mniejszej wartości, dlatego otrzymane wartości podzielono na dwa zbiory danych. Pierwszy zawiera wartości odstępu czasowego pojazdów zatrzymanych na wlocie, drugi odstępu czasowego pojazdów nie zatrzymanych na wlocie. Na podstawie pomiarów można stwierdzić, że wartości granicznych odstępu czasowego na małych rondach wynoszą około: 3 s, 4 s, 5 s. Minimalny akceptowany odstęp czasu wynosi 2 s, natomiast maksymalny zaobserwowany odstęp wynosi 9 s. Pomiary dokonywano w godzinach szczytu. W obliczeniach pominięto odstępy czasu większe bądź równe 10 s ( $t \geq 10$  s) oraz odstępy czasu mniejsze niż 2 s ( $t < 2$  s). W trakcie wykonywania pomiarów zauważono, że kierowcy na wlotach podporządkowanych stosują zasadę ograniczonego zaufania kierowców. Otrzymane wartości przedstawiono w tablicy 2.



Rys. 3. Wizualizacja sposobu generowania w programie indywidualnych wartości granicznych odstępów czasowych dla każdego pojazdu na wlocie

Fig. 3. Visualization of the method that is used for calculating the passing time needed to pass a small four-inlet traffic circle in free flow traffic



Rys. 4. Elementy geometrii małego ronda wykorzystywane w obliczeniach czasu przejazdu pojazdu na jezdni ronda wokół wyspy centralnej

Fig. 4. Elements of geometry of a small traffic circle that are used for calculating the passing time of a vehicle running around the central island

Tablica 2

Wyniki pomiarów akceptowanych przez kierowców odstępów czasu niezbędnych do wykonania manewru wjazdu na jezdnię wokół wyspy centralnej małego ronda

Lp.	Małe rondo ulic	Wartości średnie odstępów czasowych akceptowanych przez kierowców na wlocie do wykonania manewru	
		pojazdów zatrzymanych na wlocie w [s]	pojazdów nie zatrzymanych na wlocie w [s]
1.	Parkowa, Swierczewskiego, Michałkowicka w Siemianowicach Śl.	4,26	4,18
2.	Artura, Nałkowskiej, Kuźaja, Sikorskiego w Radzionkowie	4,45	4,41
3.	rondo w Swierklańcu	4,52	4,38
4.	Bytomska, Wszyńskiego, Miarki, Bytomska w Piekarach Śl.	4,67	4,20
5.	rondo w Piekarach Śląskich	4,11	3,89

Źródło: Badania własne.

#### 2.4. Czas przejazdu pojazdu przez jezdnię wokół wyspy centralnej ronda

Aby dokładnie określić trajektorię ruchu pojazdu na małym rondzie (zobacz rys. 4), należy wziąć pod uwagę następujące czynniki: kształt ronda (koło, lub kształt zbliżony do koła), średnicę zewnętrzną ronda, liczbę wlotów, liczbę pasów ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej, szerokość pasa ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej. Ponieważ długość C okręgu o promieniu r wynosi:

$$C = 2 \cdot \pi \cdot r \quad [m] \quad (3)$$

przyjęto, że pojazd przebywa drogę pomiędzy dwoma sąsiednimi wlotami równą:

$$s = \frac{2 \cdot \pi \cdot \left( \phi_z - \frac{n}{2} \right)}{k} \quad [m] \quad (4)$$

gdzie:  $s$  - droga pomiędzy dwoma sąsiednimi wlotami,  $\phi_z$  - średnica zewnętrzna ronda,  $n$  - szerokość pasa ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej,  $k$  - liczba wlotów ronda.

Przykładowo, dla czterewlotowego małego ronda w kształcie koła, jednopasowych wlotach i jednopasowej jezdni wokół wyspy centralnej niezakłócone ruchem innych pojazdów czasy przejazdu w prawo (wzór (5)), na wprost (wzór (6)), w lewo (wzór (7)), i czas zawracania (wzór (8)) na wlocie wynoszą odpowiednio:

$$t_p = \frac{2 \cdot \pi \cdot \left( \phi_z - \frac{n}{2} \right)}{k} \cdot \frac{1}{V} \cdot (3.6) \quad [s] \quad (5)$$

$$t_w = 2 \cdot \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot \left( \phi_z - \frac{n}{2} \right)}{k} \right] \cdot \frac{1}{V} \cdot (3.6) \quad [s] \quad (6)$$

$$t_l = 3 \cdot \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot \left( \phi_z - \frac{n}{2} \right)}{k} \right] \cdot \frac{1}{V} \cdot (3.6) \quad [s] \quad (7)$$

$$t_z = 4 \cdot \left[ \frac{2 \cdot \pi \cdot \left( \phi_z - \frac{n}{2} \right)}{k} \right] \cdot \frac{1}{V} \cdot (3.6) \quad [s] \quad (8)$$

gdzie:  $V$  - prędkość przejazdu pojazdu po jezdni wokół wyspy centralnej ronda, 3.6 - aby czas przejazdu uzyskać w sekundach zgodnie z zasadami przeliczeń, należy uzyskaną wartość pomnożyć przez 3.6, pozostałe oznaczenia jak we wzorze (4).

Wzory te będą ulegały zmianie w zależności od liczby wlotów, liczby pasów ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej, szerokości pasów ruchu na jezdni wokół wyspy centralnej i kształtu ronda. W modelu symulacyjnym prędkość przejazdu jezdni wokół wyspy centralnej małego ronda jest podawana przez użytkownika. Według [1] prędkość pojazdu w chwili przejazdu przez rondo wynosi dla samochodów osobowych około 38 [km/h], natomiast nie może przekroczyć 40 - 45 [km/h]. Według [2] prędkość ruchu na rondzie waha się w zakresie od 20-30 [km/h] (z wyjątkiem największych pojazdów). W programie przewidziano sytuację, że użytkownik nie będzie znał wartości tej prędkości, wtedy program dokonuje obliczeń przyjmując prędkość 33 [km/h] jako wartość średnią prędkości otrzymaną z pomiarów bezpośrednich wykonanych za pomocą pojazdu testowego, którym był samochód osobowy.

Na podstawie przeprowadzonych pomiarów prędkości przejazdu pojazdu testowego wokół wyspy centralnej małego ronda w kształcie koła (lub w kształcie zbliżonym do koła) na kilku małych rondach Górnego Śląska otrzymano następujące prędkości przejazdu (zobacz tablica 3). Prędkości pojazdów uzależniono od tego, czy pojazd poruszał się w ruchu swobodnym (nie zakłóconym ruchem innych pojazdów), czy też prędkość pojazdu była częściowo ograniczona przez pojazd poruszający się przed pojazdem testowym.

Tablica 3

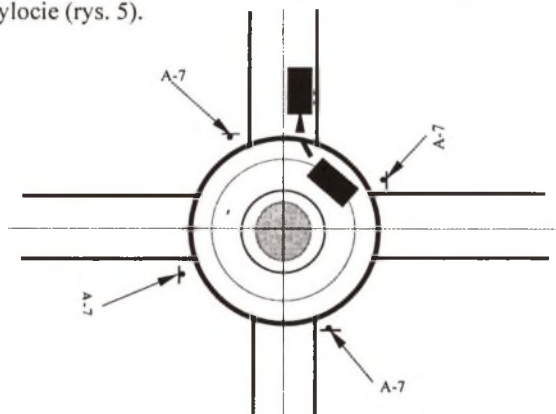
Wyniki pomiarów prędkości przejazdu pojazdu wokół wyspy centralnej małego ronda

Lp.	Małe rondo ulic	Prędkość średnia z pomiarów w [km/h]	
		w ruchu nie zakłóconym ruchem innych pojazdów	w ruchu, gdy przed pojazdem testowym poruszał się inny pojazd
1.	Parkowa, Świerczewskiego, Michałkowska w Siemianowicach Śl.	29,44≈30	21,75≈22
2.	Artura, Nałkowskiej, Kuźaja, Sikorskiego w Radzionkowie	37,84≈38	25,04≈26
3.	rondo w Świerklańcu	39,96≈40	26,72≈27
4.	Bytomska, Wyszyńskiego, Miarki, Bytomska w Piekarach Śl.	40,06≈41	30,93≈31
5.	rondo w Piekarach Śląskich	39,93≈40	34,37≈35
6.	rondo w Czeladzi	39,31≈40	36,81≈37
Wartość średnia w poszczególnych grupach		37,75	29,27
Wartość średnia ogólna		33,51	

Źródło: Badania własne.

## 2.5. Czas zjazdu pojazdu z jezdni wokół wyspy centralnej na obrany wylot

Czasy zjazdu pojazdu z jezdni wokół wyspy centralnej małego ronda na obrany wylot wynoszą: 2 s, 3 s, 4 s i są to wartości średnie uzyskane z przeprowadzonych pomiarów czasów zjazdu metodą pojazdu testowego. Wyniki pomiarów przedstawiono w tablicy 4. Jako czas zjazdu mierzono czas, jaki upłynął od momentu rozpoczęcia manewru zjazdu z jezdni wokół wyspy małego ronda do momentu osiągnięcia przez pojazd pozycji równoległej z osią pasa ruchu na wylocie (rys. 5).



Rys. 5. Schematyczne oznaczenie punktów, pomiędzy którymi mierzono czas zjazdu pojazdu z jezdni wokół wyspy centralnej na obrany wylot

Fig. 5. Schematic points notation that are used for measuring the off-time of the vehicle reaching the aim outlet

Wizualizację (w programie) sposobu obliczania czasu przejazdu przez małe rondo w ruchu swobodnym, nie zakłóconym ruchem innych pojazdów, przedstawiono na rys. 2.

Tablica 4  
Wyniki pomiarów czasów zjazdu pojazdu testowego z jezdni na obrany wylot

Lp.	Małe rondo ulic	Średnia wartość czasu zjazdu w ruchu	
		nie zakłóconym ruchem innych pojazdów w [s]	gdy przed pojazdem testowym poruszał się inny pojazd w [s]
1.	Parkowa, Świerczewskiego, Michałkowiecka w Siemianowicach Śl.	2,71	4,20
2.	Artura, Nałkowskiej, Kuźaja, Sikorskiego w Radzionkowie k. Bytomia	2,11	4,07
3.	w Świerklańcu	3,20	3,40
4.	Bytomska, Wyszyńskiego, Miarki, Bytomska w Piekarach Śl.	2,06	3,46
5.	rondo w Piekarach Śląskich	2,12	3,33
6.	rondo w Czeladzi	2,17	3,00
Wartość średnia w poszczególnych grupach		2,40	3,57
Wartość średnia ogólna		2,98	

Źródło: Badania własne.

### 3. MODEL SYMULACYJNY RUCHU POJAZDÓW NA MAŁYCH RONDACH I JEGO WŁOTACH DOJAZDOWYCH

Na bazie złożenia matematycznych budowana jest aplikacja komputerowa, która na podstawie wprowadzonych danych będzie symulować metodą kolejnych zdarzeń przepływ potoków ruchu przez małe rondo wraz z obliczeniami charakterystycznych parametrów ruchu. Szczegółowy opis struktury modelu przedstawiony jest w pracy [11]. Omawiany model symulacyjny jest programem rozwojowym, aktualnie trwają prace nad jego ukończeniem. Podany w artykule sposób obliczania czasu przejazdu pojazdów przez wszystkie przekroje modelu wykorzystywany jest w modelu symulacyjnym.

Opisana wersja programu pozwala na symulowanie ruchu i obliczanie przepustowości małych rond o liczbie jednopasowych wlotów od 3 do 6, i jednopasowej jezdni wokół wyspy centralnej. Zgłoszenia pojazdów na wlotach podczas symulacji, które nie są obsługiwane od razu, ustawiają się w kolejkach oddzielnie dla każdego wlotu.

#### Literatura

1. Streszczenie polskich seminariów bezpieczeństwa ruchu drogowego (1997-1999) część II: Struktura i projektowanie dróg w Polsce. Sugestie wynikające z praktyki holenderskiej.
2. Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych – część II. GDDP, Warszawa 2001.
3. Krystek R., Szczuraszek T.: Symulacja ruchu potoku pojazdów. WKŁ, Warszawa 1980.
4. Woch J.: Teoria potoków ruchu. Katowice 2001 (w druku).



5. Evans G.W., Wallace G. F., Sutherland G. L.: Symulacja na maszynach cyfrowych. WNT, Warszawa 1973.
6. Kittelson and Associates 2002 on-line roundabout database, URL: <http://roundabouts.kittelson.com/dbase/invmain.html>.
7. Haging O. (1998): A further generalization of Tanner's formula. Transportation Research 32B(6).
8. Haging O. (1998): Vehicle-vehicle interactions at roundabouts and their implications for the entry capacity.
9. Haging O. (2000): Estimation of Critical Gaps in Two Major Streams. Transportation Research vol. 34B(4), 2000, pp. 293-313.
10. Latoszek M.: Organizacja i technika ruchu drogowego. WSIP, Warszawa 1980.
11. Duda E.: Zastosowanie metod stochastycznych w modelu zachowania się potoków ruchu na małych rondach. Zeszyty Naukowe Pol.Śl., seria: Transport, nr 48, Gliwice 2003.

### Abstract

In Holland as well as other European countries many researches on the safety of traffic circles with one lane have been made. In places where traditional intersections were replaced by traffic circles, the number of car accidents dropped 50 percent approximately. Furthermore the number of casualties in the non build-up area dropped even up to 85 percent. What is more, this safety raising tendency has a regular nature [1]. These facts as well as many others that may be found in professional literature recommend such a solution to be applied. Small traffic circles are more valuable than many other one level intersections.