

KRZYSZTOF GASZ¹⁾

AN ATTEMPT TO DETERMINE CAPACITY OF MOVEMENTS FROM MINOR ENTRIES IN CASE OF CONGESTION ON THE MAJOR STREET

PRÓBA OKREŚLENIA PRZEPUSTOWOŚCI RELACJI PODPORZĄDKOWANYCH W SYTUACJI ZATŁOCZENIA NA JEZDNI GŁÓWNEJ

STRESZCZENIE. W artykule przedstawiono autorską metodę określenia przepustowości relacji podporządkowanych na skrzyżowaniu bez sygnalizacji, dołączających się na jezdni głównej do kolejki pojazdów spowodowanej działaniem sygnalizacji świetlnej na kolejnym skrzyżowaniu. Zaproponowany sposób obliczenia przepustowości tych relacji składa się z czterech etapów. Na początku obliczono długość pasa zwalnianą przez pojazdy opuszczające skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną. W drugim etapie określono przepustowość relacji prawoskrętnej dołączającej się do kolejki pojazdów. W kolejnym kroku obliczono przepustowość relacji lewoskrętnej dołączającej się do kolejki pojazdów. Ostatni etap to obliczenie czasu blokowania skrzyżowania przez pojazdy poruszające się w kolejce.

SŁOWA KLUCZOWE: kolejka pojazdów, przepustowość, skrzyżowanie bez sygnalizacji świetlnej.

ABSTRACT. The article presents the author's own method of determination of capacity of movements from minor entries at an unsignalized intersection, when turning vehicles join the queue of vehicles on the main street, generated due to the influence of an adjacent signalized intersection. The proposed method of capacity calculation consists of four steps. First, the length of lane vacated by the vehicles leaving the signalized intersection was calculated. Second step consisted in determination of capacity of the right-turn movement joining the queue. In the following step, capacity of the left-turn movement joining the queue was calculated. The last step consisted in calculation of the time in which the intersection is blocked by vehicles moving ahead in the queue.

KEYWORDS: vehicle queue, capacity, unsignalized intersection.

DOI :10.7409/rabdim.021.006

¹⁾ Politechnika Wrocławska, Wydział Budownictwa Lądowego i Wodnego, Katedra Dróg, Mostów, Kolei i Lotnisk, Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; krzysztof.gasz@pwr.edu.pl

1. WPROWADZENIE

Wzrastający ruch samochodowy w polskich miastach prowadzi do coraz większych utrudnień w ruchu: wydłuża się czas podróży, rosną koszty podróży poprzez dodatkowe postoje i zatrzymania, jakość powietrza w rejonie zatłoczonych ulic ulega znacznemu pogorszeniu. Widocznym skutkiem nadmiaru pojazdów są również wydłużające się kolejki pojazdów na wlotach skrzyżowań, zwłaszcza podczas szczytów komunikacyjnych. Bardzo często kolejka pojazdów tworzy się na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Nieraz przechodzi ona przez kolejne skrzyżowania z sygnalizacją świetlną lub bez sygnalizacji świetlnej.

Skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu, gdzie na jezdni głównej utrzymuje się kolejka pojazdów spowodowana działaniem sygnalizacji świetlnej na kolejnym skrzyżowaniu, jest specyficznym skrzyżowaniem pod względem możliwości wykonywania manewrów na wlotach podporządkowanych. Na dwóch kierunkach ruchu na jezdni głównej panują odmienne warunki ruchu, jednak na obu kierunkach występują cyklicznie powtarzające się stany ruchu. Cykliczność determinowana jest programem sygnalizacji na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną.

Do analiz ruchu został wybrany szczególny rodzaj skrzyżowania, gdzie jezdni główna ma dwa pasy ruchu w każdym kierunku i gdzie pojazdy z wlotów podporządkowanych dołączają się do odrębnych pasów ruchu na jezdni

1. INTRODUCTION

The growing car traffic in Polish cities leads to increasing difficulties: longer travel times, greater travel costs due to additional stoppages, significant deterioration of air quality around congested streets. Visible effects of the excess number of vehicles include the growing queues at intersection entries, especially during the periods of peak congestion. Very often such queues form at signalized intersections, sometimes spilling into adjacent signalized or unsignalized intersections.

Unsignalized intersection with vehicle queue on the main street is a specific type of intersection in terms of availability of movements from its minor entries. Traffic conditions on the two directions of the main street are different, yet some traffic flow patterns in both directions repeat cyclically. Those cycles are determined by the traffic lights program at the signalized intersection.

Traffic analyses were performed on a chosen specific type of intersection, where the main street is a dual carriageway with two lanes in each direction, and the vehicles joining from the minor entries join two separate lanes on the main street. Such a situation and traffic organization are not typical of most intersections. A diagram of the intersection with the assumed designations of entries is presented in Fig. 1.

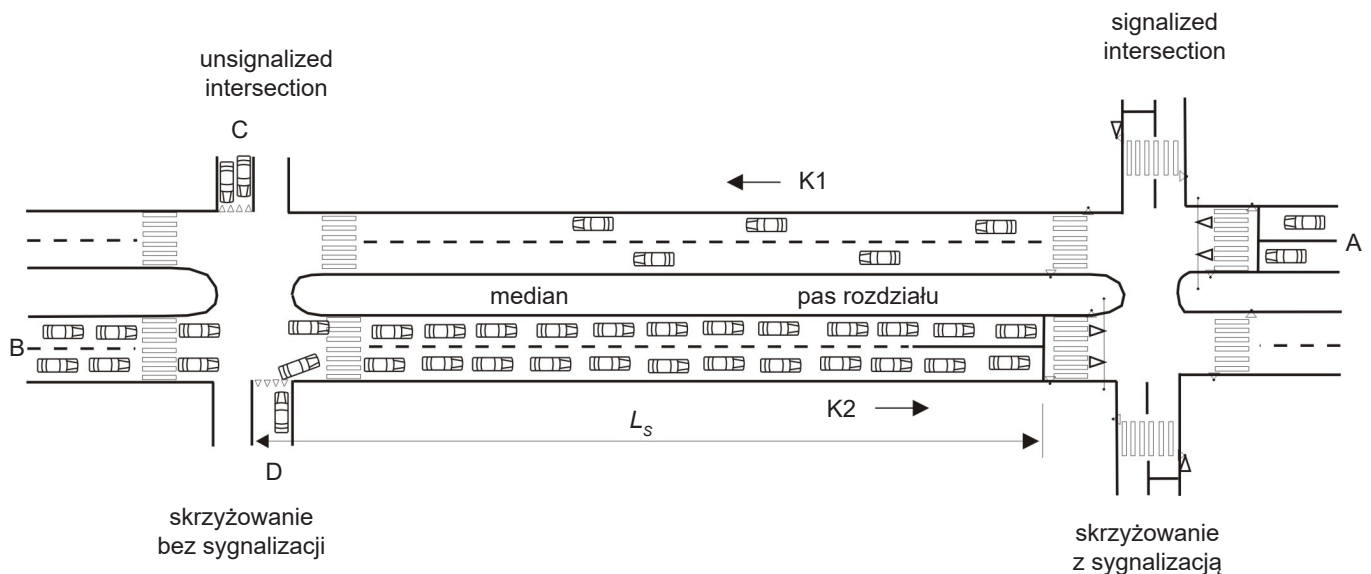


Fig. 1. Designations of entries and traffic streams
Rys. 1. Oznaczenie wlotów i potoków ruchu

głównej. Nie jest to typowa sytuacja i organizacja ruchu na skrzyżowaniach. Schemat skrzyżowania oraz zastosowane oznaczenia wlotów zostały przedstawione na Rys. 1.

Na kierunku ruchu od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną (K1) pojawia się cyklicznie kolumna pojazdów. Ze względu na odległość pomiędzy skrzyżowaniami, pojazdy jadące w kolumnie ulegają rozproszeniu. Rozproszenie to powoduje, że czas przejazdu kolumny przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu jest większy od czasu wypływania kolumny ze skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Mamy tu do czynienia ze zjawiskiem dyspersji [1-6]. Na tym kierunku może również występować ruch swobodny lub kolumnowy pojazdów spowodowany zjazdem pojazdów z innych wlotów skrzyżowania z sygnalizacją w kierunku skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu (w zależności od natężeń tych potoków ruchu).

Natomiast na kierunku prowadzącym do skrzyżowania z sygnalizacją świetlną (K2) występuje kolejka pojazdów. Kolejka ta sięga poza skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu.

Zgodnie z przepisami [7], kierujący pojazdami mają zabroniony wjazd na skrzyżowanie, jeżeli na nim lub za nim nie ma miejsca do kontynuowania jazdy. Kierujący pojazdami poruszający się w kolejce na jezdni głównej zostawiają więc na skrzyżowaniu bez sygnalizacji wolną powierzchnię (nie blokują skrzyżowania). Ta wolna powierzchnia umożliwia wykonanie wszystkich relacji z wlotów podporządkowanych.

Szczególnym typem relacji z wlotów podporządkowanych jest manewr włączenia się do kolejki pojazdów na jezdni głównej. Manewr ten wykonują dwie relacje z wlotów podporządkowanych – relacja lewoskrętna z wlotu C oraz relacja prawoskrętna z wlotu D (Rys. 1).

Pojazdy z wlotów podporządkowanych dołączające się do kolejki pojazdów na jezdni głównej wykorzystują częściowo wolną powierzchnię na skrzyżowaniu. Nie jest to natomiast jedyny sposób na włączenie się do kolejki pojazdów. W rzeczywistych warunkach na tego typu skrzyżowaniach zachodzą również interakcje pomiędzy kierującymi pojazdami na jezdni głównej a kierującymi pojazdami na wlotach podporządkowanych czy pieszymi przechodzącymi przez jezdnię główną [8-13]. Część kierujących pojazdami na jezdni głównej na obu kierunkach ruchu ustępuje pierwszeństwa przejazdu innym uczestnikom ruchu.

On the lanes coming from the signalized intersection (K1), a platoon of vehicles appears cyclically. Along the distance between the two intersections, the distances between particular vehicles moving in platoon increase. Due to this fact, time of their passage through the unsignalized intersection is greater than the time of their discharge from the signalized intersection. This phenomenon is known as dispersion [1-6]. Free-flow traffic or platoon traffic may also occur in the same direction due to inflow of vehicles turning towards the unsignalized intersection from other entries at the signalized intersection (depending on the volume of those traffic streams).

On the lanes leading towards the signalized intersection (K2), a queue of vehicles occurs, reaching beyond the unsignalized intersection.

According to traffic regulations [7], drivers are not allowed to enter the intersection when there is no space within or beyond the intersection to continue travel. Therefore, the drivers of vehicles moving in the queue on the main street leave free space on the unsignalized intersection (they avoid blocking the intersection). This free area enables all movements from the minor entries.

Joining the queue on the major street is a specific type of movement from the minor entry. This maneuver is realized by two movements from the minor entries – the left-turn movement from entry C and the right-turn movement from entry D (Fig. 1).

Vehicles from the minor entries joining the queue on the main street partly use the free area left on the intersection. However, this is not the only way of joining the queue. In real conditions drivers on the main street interact with drivers of vehicles coming from minor entries or with pedestrians crossing the main street [8-13]. Some of the drivers on the major street going in both directions yield to other traffic participants.

Capacity of unsignalized priority-controlled intersections is a very popular subject of research [14-27]. Many publications are devoted to gaps between vehicles – particularly to critical gaps [28-34].

This article presents the author's own method of determination of capacity of movements from minor entries joining the queue of vehicles on the major street.

Przepustowość skrzyżowań z pierwszeństwem przejazdu jest bardzo popularnym tematem badań [14-27]. Wiele publikacji poświęconych jest również odstępom czasu pomiędzy pojazdami, szczególnie granicznym odstępom czasu [28-34].

W niniejszym artykule przedstawiono autorską metodę określenia przepustowości relacji podporządkowanych dołączających się do kolejki pojazdów na jezdni głównej.

2. PRZYJĘTE ZAŁOŻENIA DO OKREŚLENIA PRZEPUSTOWOŚCI RELACJI PODPORZĄDKOWANYCH

Jako przekrój drogi głównej wybrano przekrój o dwóch pasach ruchu w każdym kierunku oddzielonych od siebie pasem rozdziału (przekrój 2×2). Przekroje takie są dominujące na głównych arteriach komunikacyjnych dużych miast Polski.

Natomiast na ulicach podporządkowanych przyjęto jeden pas ruchu w każdym kierunku. Na wlotach podporządkowanych, z których korzystają głównie samochody osobowe, założono formowanie się dwóch kolejek pojazdów. Jedna kolejka pojazdów związana jest z relacją dołączającą się do kolejki na jezdni głównej, natomiast druga kolejka pojazdów związana jest z pozostałymi relacjami. Taka sytuacja miała miejsce na wielu obserwowanych skrzyżowaniach we Wrocławiu i Opolu [35]. Sytuację tę przedstawiono na Rys. 2.

W przypadku kolejki pojazdów na dwóch wlotach podporządkowanych założono, że pojazdy relacji prawoskrętnej z wlotu D włączają się tylko na prawy pas ruchu jezdni głównej, natomiast pojazdy relacji lewoskrętnej z wlotu C włączają się tylko na lewy pas ruchu (Rys. 2). Taki rozkład ruchu znacznie upraszcza obliczenia przepustowości. W rzeczywistych warunkach kierujący pojazdami, zajmując pasy ruchu, mają na uwadze kontynuację jazdy i długość kolejki na sąsiednim pasie ruchu.

Włączenie się pojazdów tych relacji podporządkowanych do kolejki pojazdów na jezdni głównej możliwe jest w następujących sytuacjach:

- wykorzystania odstępów czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce większych od granicznych odstępów czasu,
- wykorzystania uprzejmości kierowców na jezdni głównej (udzielenia pierwszeństwa przejazdu),

2. ASSUMPTIONS ADOPTED FOR DETERMINATION OF CAPACITY OF MOVEMENTS FROM MINOR ENTRIES

The chosen main street section was a dual carriageway with two lanes in each direction, divided by a median (2×2 section). Such street sections are dominant on the main transportation arteries in Polish urban agglomerations.

On the minor entries, one lane in each direction was assumed. However, since the minor entries are mainly used by drivers of passenger cars, spontaneous generation of two queues of vehicles was assumed. One queue is for movements joining the queue at the major street and the other for remaining movements. Such situations were noted on many observed intersections in Wrocław and Opole [35]. Movements from the minor entries are shown in Fig. 2.

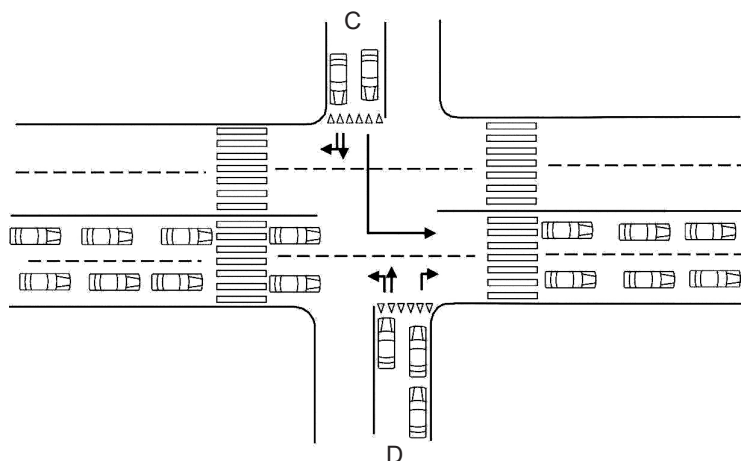


Fig. 2. Arrangement of vehicles at the minor entries
Rys. 2. Ustawienie pojazdów na wlotach podporządkowanych

In the case of queue on both minor entries it was assumed that the vehicles turning right from entry D join the queue only on the right lane of the main street, while vehicles turning left from entry C join the queue only on the left lane of the main street (Fig. 2). Such separation of traffic greatly simplifies the capacity calculations. In real conditions the drivers choose lanes on the main street, taking into account the direction of the planned travel and the length of the queue on the neighboring lane.

Joining of vehicles from minor entries into the queue on the main street is possible in the following situations:

- when gaps larger than the critical gap occur between the vehicles moving in the queue,

- wykorzystania dużych odstępów czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce spowodowanych udzielaniem pierwszeństwa pieszym przechodzącym przez jezdnię główną,
- wykorzystania wolnej powierzchni pozostawionej na środku skrzyżowania przez pojazdy poruszające się w kolejce.

Przepustowości obu relacji podporządkowanych włączających się do kolejki pojazdów na jezdni głównej nie są jednakowe. Włączenie relacji lewoskrętnej uzależnione jest między innymi od potoku ruchu jadącego od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. Wpływ ten może być częściowo niwelowany przez obecność w pasie rozdzielu powierzchni akumulacji umożliwiającej wykonanie manewru lewoskrętu w dwóch etapach.

3. AUTORSKA METODA OKREŚLENIA PRZEPUSTOWOŚCI RELACJI PODPORZĄDKOWANYCH

3.1. DŁUGOŚĆ PASA RUCHU ZWALNIANA PRZEZ POJAZDY OPUSZCZAJĄCE SKRZYŻOWANIE Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLĄ PODCZAS JEDNEGO CYKLU (WLOT OD KIERUNKU B)

Liczbę pojazdów opuszczających wlot skrzyżowania z sygnalizacją świetlną z jednego pasa ruchu można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$n_0 = \frac{G_e^B}{\Delta t_0}, \quad (1)$$

gdzie:

G_e^B – efektywna długość sygnału zielonego na wlocie od kierunku B [s],

Δt_0 – średni odstęp czasu pomiędzy pojazdami przekraczającymi linię zatrzymania na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną [s].

Wzór (1) można stosować jedynie w przypadku zastosowania ogólnego sterowania ruchem dla całego wlotu oraz przy braku wydzielonych pasów ruchu dla relacji skrętnych.

Efektywną długość sygnału zielonego można wyznaczyć na podstawie wzoru [36]:

$$G_e^B = G + \dot{Z} - (t_r + t_z), \quad (2)$$

- when a driver of a vehicle on the major street yields to a vehicle from the minor street,
- when a large gap between the vehicles moving in the queue occurs due to yielding to pedestrians crossing the main street,
- when free area is left at the intersection by vehicles moving in the queue on the major street and used by vehicles from the minor entries.

The capacities of both movements joining the queue on the main street are different. The left-turn maneuver depends, among others, on the flow of traffic incoming from the signalized intersection. This influence may be partially mitigated by a storage zone in the median, enabling division of the left-turn maneuver into two stages.

3. THE AUTHOR'S METHOD OF DETERMINATION OF CAPACITY OF MOVEMENTS FROM MINOR ENTRIES

3.1. THE LENGTH OF LANE VACATED BY VEHICLES DISCHARGING FROM THE SIGNALIZED INTERSECTION DURING A SINGLE CYCLE (ENTRY FROM THE DIRECTION B)

The number of vehicles discharging from the entry of the signalized intersection on a single lane may be calculated based on the relationship:

$$n_0 = \frac{G_e^B}{\Delta t_0}, \quad (1)$$

where:

G_e^B – effective green time for the entry from direction B [s],

Δt_0 – average headway between vehicles crossing the stop line at the entry of the signalized intersection [s].

Equation (1) may be used only when the entire entry is governed by the same general signal, without separated lanes for turning movements.

The effective green time may be determined from [36]:

$$G_e^B = G + \dot{Z} - (t_r + t_z), \quad (2)$$

gdzie:

G – długość sygnału zielonego [s],

\dot{Z} – długość sygnału żółtego [s],

t_r – czas reakcji kierowcy [s],

t_z – czas tracony na końcu sygnału żółtego [s].

Sumaryczny czas tracony ($t_r + t_z$) należy przyjmować jako równy 2 sekundy [36].

Średni odstęp czasu pomiędzy pojazdami przekraczającymi linię zatrzymania na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną (przy braku blokowania wyjazdu przez ewentualne kolejki pojazdów z kolejnego skrzyżowania) można obliczyć na podstawie zależności:

$$\Delta t_0 = \frac{3600}{S}, \quad (3)$$

gdzie:

S – natężenie nasycenia pasa ruchu [P/h] obliczone zgodnie z [36].

Pojazdy opuszczające skrzyżowanie podczas sygnału zielonego zostawiają po sobie wolną jezdnię zajmowaną przez kolejne pojazdy. Długość tego odcinka jest zwalniana długością pasa ruchu. Długość tę na jednym pasie ruchu można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$L_z = n_0 \cdot l_p, \quad (4)$$

gdzie:

L_z – długość pojedynczego pasa ruchu zwalniana przez pojazdy opuszczające skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną podczas jednego cyklu [m],

n_0 – liczba pojazdów na jednym pasie ruchu opuszczających wlot skrzyżowania podczas jednego cyklu [P],

l_p – średnia długość pojazdu w kolejce [m].

Średnią długość pojazdu w kolejce wyznaczyć można następująco:

$$l_p = u_o \cdot l_o + u_c \cdot l_c + u_{cp} \cdot l_{cp}, \quad (5)$$

gdzie:

u_o, u_c, u_{cp} – udziały w ruchu samochodów osobowych, ciężarowych i ciężarowych z przyczepą na danym pasie ruchu [-],

l_o, l_c, l_{cp} – średnia długość w kolejce samochodu osobowego, ciężarowego oraz ciężarowego z przyczepą [m].

where:

G – green time [s],

\dot{Z} – yellow time [s],

t_r – time of driver reaction [s],

t_z – time lost at the end of the yellow signal [s].

The total time lost ($t_r + t_z$) should be assumed as 2 seconds [36].

The average headway between vehicles crossing the stop line at the entry of the signalized intersection (assuming that the exit from the intersection is not blocked by queues spilling from further intersections) may be calculated based on the relationship:

$$\Delta t_0 = \frac{3600}{S}, \quad (3)$$

where:

S – saturation flow rate of the lane [veh./h], calculated according to [36].

The vehicles that leave the intersection during the green signal vacate space which is then occupied by following vehicles. The length of this space is the vacated length of the lane, which may be calculated for a given lane from:

$$L_z = n_0 \cdot l_p, \quad (4)$$

where:

L_z – length of a single lane vacated by the vehicles discharging from the signalized intersection during one cycle [m],

n_0 – the number of vehicles discharging from the entry of the signalized intersection on a single lane during one cycle [veh.],

l_p – average length of vehicle in the queue [m].

The average length of vehicle in the queue may be determined from the following equation:

$$l_p = u_o \cdot l_o + u_c \cdot l_c + u_{cp} \cdot l_{cp}, \quad (5)$$

where:

u_o, u_c, u_{cp} – share of passenger vehicles, heavy vehicles and heavy vehicles with trailer, respectively, on a given lane [-],

l_o, l_c, l_{cp} – average length of a passenger vehicle, heavy vehicle and heavy vehicle with trailer, respectively [m].

Table 1. Average lengths of vehicles in the queue

Tablica 1. Średnie długości pojazdów w kolejce

Type of vehicle / Rodzaj pojazdu	Length of vehicle in the queue [m] / Długość pojazdu w kolejce
Passenger or delivery vehicle / Samochód osobowy i dostawczy	6.2
Heavy vehicle / Samochód ciężarowy	9.8
Heavy vehicle with trailer / Samochód ciężarowy z przyczepą	18.3

Średnia długość pojazdów w kolejce została określona na podstawie badań wykonanych na kilku skrzyżowaniach we Wrocławiu [35]. Wyniki tych badań przedstawiono w Tabl. 1. Podczas badań autobusy podzielone zostały na dwie grupy: autobusy zwykłe i autobusy przegubowe. Autobusy zwykłe zostały wliczone do samochodów ciężarowych, zaś autobusy przegubowe do samochodów ciężarowych z przyczepą. Wartość zaobserwowanej długości samochodu osobowego stojącego w kolejce jest taka sama, jaką podaje [36]. Natomiast w [36] nie rozróżniono długości samochodów ciężarowych i samochodów ciężarowych z przyczepą. Potraktowano je jako jedną grupę pojazdów (pojazdy ciężkie), włączając do niej również autobusy.

W obrębie skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu zwalniana długość pasa ruchu L_z determinuje przejazd pojazdów w kolejce oraz dołączanie się do kolejki pojazdów z wlotów podporządkowanych.

3.2. OKREŚLENIE PRZEPUSTOWOŚCI RELACJI PRAWOSKRĘTNEJ Z WLOTU D

Dołączenie się pojazdów relacji prawoskrętnej z wlotu D do kolejki pojazdów na jezdni głównej możliwe jest w następujących przypadkach: wykorzystania odstępu między pojazdami na jezdni głównej większego od granicznego odstępu czasu, wykorzystania uprzejmości kierowców (udzielanie pierwszeństwa), wykorzystania większego odstępu czasu między pojazdami na jezdni głównej spowodowanego udzieleniem pierwszeństwa pieszym oraz wykorzystania pozostawionej wolnej powierzchni na środku skrzyżowania.

Badania granicznych odstępu czasu dla pojazdów relacji prawoskrętnej dołączającej się do kolejki pojazdów na jezdni głównej zostały wykonane na kilku skrzyżowaniach we Wrocławiu i Opolu. Szczegółowo badania te zostały opisane w [35]. Im bliżej sygnalizacji świetlnej znajdują się kierujący pojazdami w chwili zapalenia sygnału zielonego, tym mają większą pewność, że przejadą podczas sygnału zielonego, więc poruszają się z większą prędkością. Widoczna jest również okresowość ruchu

The average length of vehicles in the queue was determined based on investigations performed on several intersections in Wrocław [35]. The results are shown in Table 1. During the surveys, standard buses were counted as heavy vehicles, while articulated buses were counted as heavy vehicles with trailers. The value of the observed length of a passenger car in the queue was the same as given in [36]. However, in [36] heavy vehicles are not distinguished from heavy vehicles with trailer. They are treated as a single group (heavy vehicles), including buses as well.

The length of the lane vacated at the signalized intersection L_z determines the movement of vehicles in the queue and the possibility of joining the queue by vehicles from minor entries at the unsignalized intersection.

3.2. DETERMINATION OF CAPACITY OF THE RIGHT-TURN MOVEMENT FROM ENTRY D

Joining the queue on the main street by vehicles turning right from minor entry D is possible in the following situations: when gaps larger than the critical gap occur between the vehicles moving in the queue, when a driver from the major street yields to a vehicle from the minor street, when a large gap in the queue occurs due to yielding to pedestrians crossing the main street, when free area is left at the intersection by vehicles moving in the queue on the major street.

Investigations of critical gaps (the term “gap” is used synonymously with “headway”) for vehicles turning right and joining the queue on the main street were performed on several intersections in Wrocław and Opole. This research was described in detail in [35]. The closer to traffic lights the drivers are when the green signal commences, the more confident they are that they will pass the intersection during the green signal, and therefore, the greater the speed they reach. Periodic character of traffic is also observed, related to the program of the traffic signal. The drivers that wait in the queue far from the stop line start moving only after some time, even after the red signal has appeared, so they move at lower speeds. Vehicle speeds

związana z programem sygnalizacji. Natomiast kierujący pojazdami, którzy oczekują w kolejce daleko od linii zatrzymania, ruszają dopiero po pewnym czasie, kiedy na sygnalizatorze może być już wyświetlany sygnał czerwony, więc poruszają się z mniejszą prędkością. Podczas badań nie prowadzono analiz związanych z prędkościami pojazdów. Zaobserwowano natomiast, że okresowość ruchu zanika, gdy kolejka pojazdów przekracza 200 metrów. Wówczas pojazdy w kolejce poruszają się już wolniej niż pojazdy bliżej linii zatrzymania. Przy długości kolejki do około 200 metrów od linii zatrzymania graniczny odstęp czasu dla pojazdów relacji prawoskrętnej dołączających się do kolejki pojazdów wynosi $t_g = 3,4$ s, natomiast przy długościach kolejki większych niż 200 metrów odstęp ten wynosi $t_g = 3,0$ s.

were not analyzed during the research. It was observed, however, that the periodic nature of traffic disappears when the length of the queue exceeds 200 meters. Then the vehicles in the queue move slower than the vehicles that are closer to the stop line. When the length of the queue is less than approx. 200 m from the stop line, the critical gap for vehicles turning right and joining the queue equals $t_g = 3.4$ s, while for queue lengths greater than 200 m the critical gap equals $t_g = 3.0$ s.

During the field investigations, headway between vehicles passing through a given point in the queue was measured and the proportion of gaps greater than the critical gap was determined. The results are presented in Fig. 3.

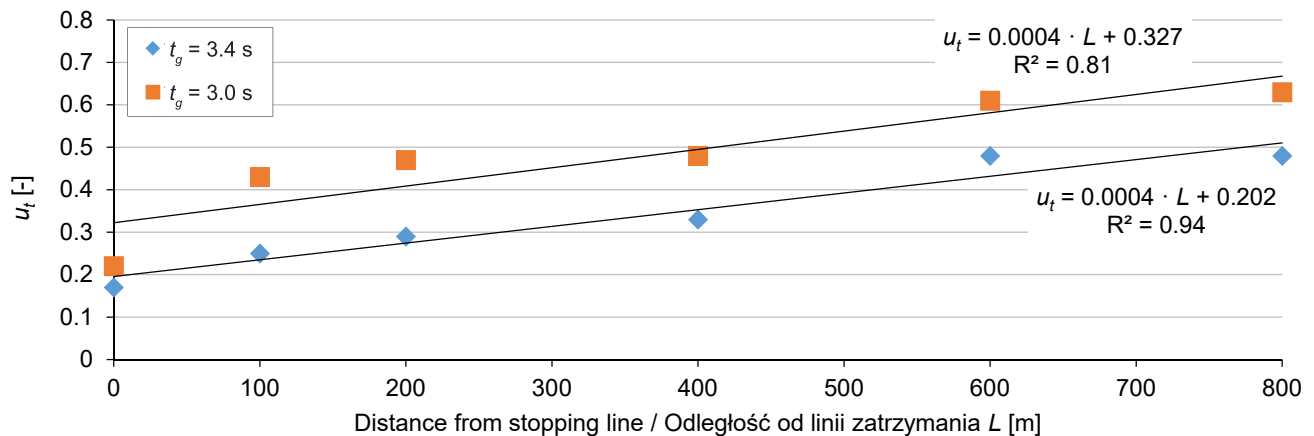


Fig. 3. The proportion of gaps greater than the critical gap between vehicles in the queue depending on the distance from the stop line

Rys. 3. Udział odstępów czasu większych od granicznych wśród odstępów między pojazdami przejeżdżającymi w kolejce w zależności od odległości od linii zatrzymania

Podczas przeprowadzonych badań przeanalizowano również odstępy czasu pomiędzy pojazdami przejeżdżającymi przez określony przekrój w kolejce i określono udział odstępów czasu większych od granicznych. Wyniki tych badań przedstawiono na Rys. 3.

Dokonano aproksymacji zależności funkcją liniową:

- dla $t_g = 3,0$ s:

$$u_t = 0,0004 \cdot L + 0,327, \quad (6)$$

- dla $t_g = 3,4$ s:

$$u_t = 0,0004 \cdot L + 0,202, \quad (7)$$

The relationships were described using linear approximation:

- for $t_g = 3.0$ s:

$$u_t = 0.0004 \cdot L + 0.327, \quad (6)$$

- for $t_g = 3.4$ s:

$$u_t = 0.0004 \cdot L + 0.202, \quad (7)$$

where:

u_t – proportion of gaps greater than the critical gap between vehicles in the queue [-],

L – distance from the stop line of the signalized intersection [m].

gdzie:

u_t – udział odstępów czasu między pojazdami poruszającymi się w kolejce większych od granicznych odstępów czasu [-],

L – odległość od linii zatrzymania [m].

Aby określić przepustowość relacji prawoskrętnej z wlotu D dołączającej się do kolejki pojazdów na jezdni głównej, konieczne jest rozwiązanie równania:

$$L_z = n \cdot l_p + u_t \cdot n \cdot l_p^D + p_{poj} \cdot n \cdot n_{up} \cdot l_p^D + n_{piesi}^D \cdot l_p^D + l_{sk}, \quad (8)$$

gdzie:

L_z – długość pojedynczego pasa ruchu zwalniana przez pojazdy opuszczające skrzyżowanie podczas jednego cyklu [m],

n – liczba pojazdów z kolejki przejeżdżających przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu w jednym cyklu [P],

l_p – średnia długość pojazdu w kolejce [m],

u_t – udział odstępów między pojazdami poruszającymi się w kolejce większych od granicznego odstępu czasu [-],

l_p^D – średnia długość pojazdu na wlocie podporządkowanym [m],

p_{poj} – prawdopodobieństwo udzielenia pierwszeństwa pojazdom z wlotów podporządkowanych przez kierujących pojazdami na jezdni głównej [-],

n_{up} – średnia liczba pojazdów z wlotu podporządkowanego, którym kierujący pojazdem na drodze głównej udziela pierwszeństwa [P],

n_{piesi}^D – liczba pojazdów z wlotu D włączających się do kolejki pojazdów poprzez wykorzystanie większego odstępu między pojazdami poruszającymi się w kolejce spowodowanego udzieleniem pierwszeństwa pieszym przez kierujących pojazdami na jezdni głównej [P],

l_{sk} – długość wolnej powierzchni na jednym pasie ruchu pozostawionej w obrębie skrzyżowania przez pojazdy poruszające się w kolejce [m].

Równanie (8) jest równaniem liniowym z jedną niewiadomą n .

In order to determine the capacity of right-turn movement from entry D joining the queue on the main street, it is necessary to solve the following equation:

$$L_z = n \cdot l_p + u_t \cdot n \cdot l_p^D + p_{poj} \cdot n \cdot n_{up} \cdot l_p^D + n_{piesi}^D \cdot l_p^D + l_{sk}, \quad (8)$$

where:

L_z – length of a single lane vacated by vehicles discharging from the signalized intersection during one cycle [m],

n – the number of vehicles in the queue passing through the priority-controlled unsignalized intersection during one cycle [veh.],

l_p – average length of vehicle in the queue [m],

u_t – proportion of gaps greater than the critical gap between vehicles in the queue [-],

l_p^D – average length of vehicle from the minor entry D [m],

p_{poj} – probability of drivers from the major street yielding to drivers from minor entries [-],

n_{up} – average number of vehicles from minor entry that a driver from the major street yields to [veh.],

n_{piesi}^D – the number of vehicles from entry D that join the queue using a larger gap that occurs due to drivers on the main street yielding to pedestrians crossing the main street [veh.],

l_{sk} – length of free space left on a single lane within the intersection by vehicles moving in the queue [m].

Equation (8) is a linear equation with one unknown n .

Drivers moving in the queue on the main street sometimes yield to drivers from minor entries. Based on the research conducted in several locations in Wrocław and Opole [35], it was observed that when the queue is shorter than approx. 200 m the probability of yielding equals $p_{poj} = 0.21$, while for greater lengths of the queue it equals $p_{poj} = 0.44$.

In some situations, a single driver on the main street yields to several vehicles from the minor entry. This possibility is taken into account by the n_{up} factor. In most cases, however, n_{up} equals one.

Kierujący pojazdami poruszający się w kolejce na jezdni głównej udzielają czasem pierwszeństwa przejazdu pojazdom z wlotów podporządkowanych. Na podstawie przeprowadzonych badań ruchu w kilku miejscach we Wrocławiu i Opolu [35] zaobserwowano, że gdy kolejka pojazdów ma długość do około 200 metrów, prawdopodobieństwo udzielenia pierwszeństwa wynosi $p_{poj} = 0,21$, natomiast przy większych długościach prawdopodobieństwo to wynosi $p_{poj} = 0,44$.

W niektórych sytuacjach kierujący pojazdem poruszający się w kolejce na jezdni głównej udziela pierwszeństwa przejazdu kilku pojazdom z wlotu podporządkowanego. Sytuację tę uwzględnia współczynnik n_{up} . W większości przypadków n_{up} jest równe jedności.

Aby określić liczbę pojazdów n_{piesi}^D , wykonano badania symulacyjne w programie Visual Basic for Applications. Szczegółowy opis modelu symulacyjnego został przedstawiony w [35, 37]. Opis procesu zgłoszeń pieszych do przejścia dla pieszych przedstawiono w [38]. Przyjęto nierównomierny dopływ pieszych do przejścia. Badania wykonano dla czterech różnych długości sygnału zielonego dla potoku poruszającego się w kolejce G^B (10 s, 20 s, 30 s, 40 s) oraz dla sześciu różnych natężeń ruchu pieszych przechodzących przez jezdnię główną Q_{piesi} (100 os./h, 200 os./h, 300 os./h, 400 os./h, 500 os./h, 600 os./h). Uwzględniono jednakową liczbę pieszych na wszystkich przejściach na jezdni głównej. Wyniki uzyskane z badań symulacyjnych zostały przedstawione na Rys. 4.

In order to determine the number of vehicles n_{piesi}^D , simulations were performed using the Visual Basic for Applications software. A detailed description of the simulation model was presented in [35, 37]. The process of pedestrian approach to the crossing was described in [38]. Irregular flow of pedestrians approaching the crossing was assumed. The simulations were conducted for four different green times for the traffic moving in the queue G^B (10 s, 20 s, 30 s, 40 s) and six different volumes of pedestrian traffic crossing the main street Q_{piesi} (100 p/h, 200 p/h, 300 p/h, 400 p/h, 500 p/h, 600 p/h). Identical number of pedestrians on all the crossings on the main street was assumed. The results obtained from simulations are presented in Fig. 4. The relationship between the number of vehicles using the gaps caused by pedestrians n_{piesi}^D and the volume of pedestrian traffic is linear. The relationship was expressed using linear approximation. The following equations were obtained:

- for green time of $G^B = 10$ s:

$$n_{piesi}^D = 0.0009 \cdot Q_{piesi} + 0.223, \quad (9)$$

- for green time of $G^B = 20$ s:

$$n_{piesi}^D = 0.0022 \cdot Q_{piesi} + 0.290, \quad (10)$$

- for green time of $G^B = 30$ s:

$$n_{piesi}^D = 0.0038 \cdot Q_{piesi} + 0.467, \quad (11)$$

- for green time of $G^B = 40$ s:

$$n_{piesi}^D = 0.0052 \cdot Q_{piesi} + 0.692. \quad (12)$$

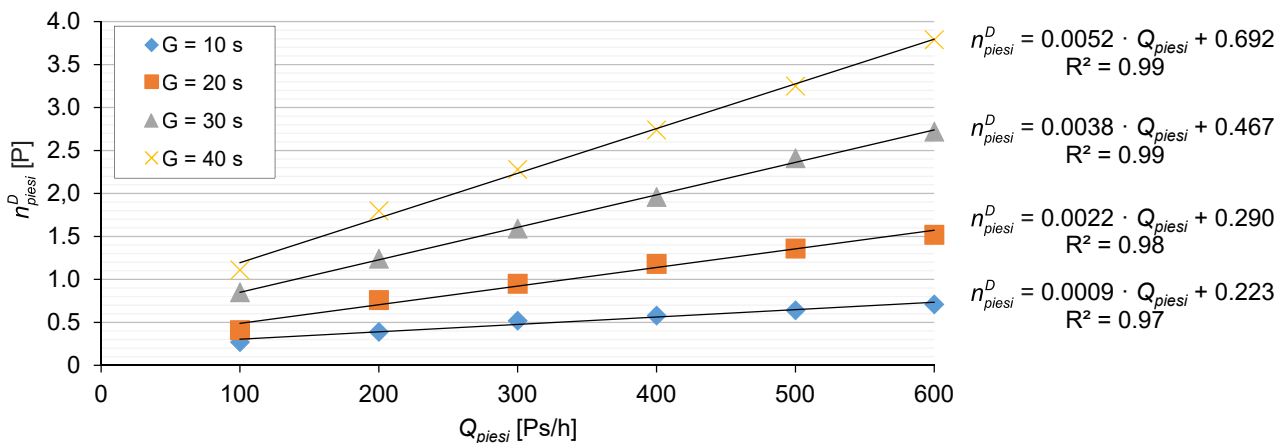


Fig. 4. The influence of pedestrian traffic volume Q_{piesi} and duration of green signal G^B on the number of vehicles from entry D joining the queue

Rys. 4. Wpływ natężenia ruchu pieszego Q_{piesi} oraz długości sygnału zielonego G^B na liczbę pojazdów z wlotu D włączających się do kolejki

Zależność pomiędzy liczbą pojazdów wykorzystujących większe odstępy czasu n_{piesi}^D a natężeniem ruchu pieszego jest liniowa. Dokonano aproksymacji zależności funkcją liniową. Otrzymano następujące równania:

- dla długości sygnału zielonego $G^B = 10$ s:

$$n_{piesi}^D = 0,0009 \cdot Q_{piesi} + 0,223, \quad (9)$$

- dla długości sygnału zielonego $G^B = 20$ s:

$$n_{piesi}^D = 0,0022 \cdot Q_{piesi} + 0,290, \quad (10)$$

- dla długości sygnału zielonego $G^B = 30$ s:

$$n_{piesi}^D = 0,0038 \cdot Q_{piesi} + 0,467, \quad (11)$$

- dla długości sygnału zielonego $G^B = 40$ s:

$$n_{piesi}^D = 0,0052 \cdot Q_{piesi} + 0,692. \quad (12)$$

Liczbę pojazdów relacji prawoskrętnej z wlotu D dołączających się do kolejki pojazdów na jezdni głównej podczas jednego cyklu można otrzymać na podstawie zależności:

$$n_T^{DP} = \frac{L_z - n \cdot l_p}{l_p^D}. \quad (13)$$

Przepustowość relacji prawoskrętnej z wlotu podporządkowanego D można obliczyć na podstawie równania:

$$C^{DP} = n_T^{DP} \cdot \frac{3600}{T}, \quad (14)$$

gdzie:

- C^{DP} – przepustowość relacji prawoskrętnej z wlotu podporządkowanego D [P/h],
- n_T^{DP} – liczba pojazdów relacji prawoskrętnej z wlotu D dołączających się do kolejki w jednym cyklu [P],
- T – długość cyklu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną [s].

3.3. OKREŚLENIE PRZEPUSTOWOŚCI RELACJI LEWOSKRĘTNEJ Z WLOTU C

Włączenie się pojazdów relacji lewoskrętnej z wlotu podporządkowanego C do kolejki pojazdów na jezdni głównej jest manewrem bardziej skomplikowanym niż włączenie się do tej kolejki pojazdów relacji prawoskrętnej z wlotu podporządkowanego D. Kierujący pojazdami relacji lewoskrętnej muszą uwzględnić również potok kolumnowy płynący od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną oraz relację na wprost z przeciwnego wlotu podporządkowanego (założono, że relacja w prawo z przeciwnego wlotu zajmuje tylko prawy pas ruchu na jezdni głównej).

The number of vehicles turning right from entry D and joining the queue on the main street during one cycle may be calculated from:

$$n_T^{DP} = \frac{L_z - n \cdot l_p}{l_p^D}. \quad (13)$$

The capacity of the right-turn movement from the minor entry D may be determined using the equation:

$$C^{DP} = n_T^{DP} \cdot \frac{3600}{T}, \quad (14)$$

where:

C^{DP} – capacity of the right-turn movement from the minor entry D [P/h],

n_T^{DP} – the number of vehicles turning right from entry D and joining the queue on the main street during one cycle [veh.],

T – cycle length at the signalized intersection [s].

3.3. DETERMINATION OF CAPACITY OF THE LEFT-TURN MOVEMENT FROM ENTRY C

Joining the queue by vehicles from the left-turn movement from minor entry C is a more complicated maneuver than joining by vehicles turning right from entry D. Drivers turning left from entry C have to take into account the platoon traffic incoming from the signalized intersection and the vehicles going ahead from the opposite minor entry (it was assumed that the right-turn movement from the opposite entry joins only the right lane on the major street). The most advantageous situation occurs when the forward movement of the queue in direction K2 and the platoon traffic in direction K1 do not overlap in time. In such a case capacity of the left-turn movement from entry C may be comparable to capacity of the right-turn movement from entry D, given that the ahead traffic from entry D is insubstantial (which was the situation assumed in the analysis). The worst situation occurs when both priority streams (platoon traffic and queue) move simultaneously. Then joining the queue is possible only through using free space left on the intersection by drivers on the major street. Limitations resulting from platoon traffic incoming from the signalized intersection may be mitigated to some extent if there is storage space in the median enabling drivers from entry C to turn left in two stages.

Najlepsza sytuacja występuje wtedy, gdy przesuwanie się kolejki na jednym kierunku ruchu oraz ruch kolumnowy na drugim kierunku ruchu nie pokrywają się w czasie. W takiej sytuacji przepustowość relacji lewoskrętnej z wlotu C może być podobna do przepustowości relacji prawoskrętnej z wlotu D, jeżeli relacja na wprost z przeciwnego wlotu jest niewielka (taka sytuacja została przyjęta w analizach). Najgorsza sytuacja występuje wtedy, gdy oba ruchy (kolumnowy i przesuwanie się kolejki) zachodzą jednocześnie. Wówczas możliwe jest włączenie się do kolejki pojazdów jedynie poprzez wykorzystanie wolnej powierzchni pozostawianej na skrzyżowaniu przez pojazdy z pierwszeństwem przejazdu. Ograniczenie wywołane uwzględnieniem ruchu kolumnowego płynącego od skrzyżowania z sygnalizacją świetlną może być częściowo niwelowane przez obecność powierzchni akumulacji (w pasie rozdziału), umożliwiającej wykonanie lewoskrętu z wlotu C w dwóch etapach.

Założono, że liczba pojazdów relacji lewoskrętnej z wlotu C dołączających się do kolejki podczas jednego cyklu może być przedstawiona za pomocą zależności:

$$n_T^{CL} = n_T^{DP} \cdot f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak}), \quad (15)$$

gdzie:

n_T^{CL} – liczba pojazdów relacji lewoskrętnej z wlotu C dołączających się do kolejki podczas jednego cyklu [P],

n_T^{DP} – liczba pojazdów relacji prawoskrętnej z wlotu D dołączających się do kolejki podczas jednego cyklu [P],

G^B – długość sygnału zielonego dla potoku poruszającego się w kolejce [s],

Q_{piesi} – natężenie ruchu pieszych przechodzących przez jezdnię główną [os./h],

P_{ak} – pojemność powierzchni akumulacji dla relacji lewoskrętnej na środku skrzyżowania [P].

Aby określić funkcję $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$, wykonano badania symulacyjne w programie Visual Basic for Applications. Opis modelu, przyjęte założenia i parametry ruchu oraz jego kalibracja przedstawione zostały w [35]. Badania symulacyjne przeprowadzono dla trzech długości sygnału zielonego G^B (20 s, 30 s, 40 s), dla czterech natężeń ruchu pieszego Q_{piesi} (0 os./h, 200 os./h, 400 os./h, 600 os./h na każdym przejściu dla pieszych na jezdni głównej) oraz dla pięciu pojemności powierzchni akumu-

It was assumed that the number of vehicles turning left from entry C and joining the queue in one cycle may be represented as:

$$n_T^{CL} = n_T^{DP} \cdot f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak}), \quad (15)$$

where:

n_T^{CL} – the number of vehicles turning left from entry C and joining the queue during one cycle [veh.],

n_T^{DP} – the number of vehicles turning right from entry D and joining the queue during one cycle [veh.],

G^B – green time for the stream moving in the queue [s],

Q_{piesi} – volume of pedestrian traffic crossing the main street [p/h],

P_{ak} – the number of storage spaces in the median for left-turn movement [veh.].

In order to determine the function $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$, simulations were performed using the Visual Basic for Applications software. Description of the model, adopted assumptions, traffic parameters and calibration are presented in [35]. Simulations were conducted for three green times G^B (20 s, 30 s, 40 s), four volumes of pedestrian traffic Q_{piesi} (0 p/h, 200 p/h, 400 p/h, 600 p/h on each crossing on the main street) and five storage capacities of the central median P_{ak} (0 veh., 1 veh., 2 veh., 3 veh., 4 veh.). The traffic signal program was set in such a manner that the platoon traffic going through the unsignalized intersection stopped moving in the middle of the period in which the queue moved. The obtained results are presented in Table 2.

Based on the conducted simulations, it is visible that there is no relationship between the function $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$ and pedestrian traffic volume (Q_{piesi}) or green time for direction B (G^B). Relationship is evident, however, between the function and the number of storage spaces in the median. The greater the number of vehicles that may be stored in the central median, the higher the values of $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$. Since the function $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$ is not dependent on green time for direction B or pedestrian traffic volume, it was replaced by f_L coefficient, which is related only to the number of storage spaces in the median. The values of f_L , determined as the mean values from the obtained results are presented in Table 3.

Table 2. The obtained values of the correction function for capacity of the left-turn movement from entry C
 Tablica 2. Wyniki badań funkcji korygującej przepustowość relacji lewoskrętnej z wlotu C

$Q_{piesi} = 0 \text{ p/h} / Q_{piesi} = 0 \text{ os./h}$					
G^B [s]	$P_{ak} = 0$	$P_{ak} = 1$	$P_{ak} = 2$	$P_{ak} = 3$	$P_{ak} = 4$
20	0.45	0.62	0.77	0.85	0.95
30	0.45	0.62	0.77	0.86	0.94
40	0.49	0.64	0.78	0.85	0.95
$Q_{piesi} = 200 \text{ p/h} / Q_{piesi} = 200 \text{ os./h}$					
G^B [s]	$P_{ak} = 0$	$P_{ak} = 1$	$P_{ak} = 2$	$P_{ak} = 3$	$P_{ak} = 4$
20	0.43	0.64	0.78	0.89	0.93
30	0.43	0.63	0.77	0.87	0.95
40	0.44	0.63	0.76	0.86	0.96
$Q_{piesi} = 400 \text{ p/h} / Q_{piesi} = 400 \text{ os./h}$					
G^B [s]	$P_{ak} = 0$	$P_{ak} = 1$	$P_{ak} = 2$	$P_{ak} = 3$	$P_{ak} = 4$
20	0.46	0.67	0.76	0.88	0.94
30	0.47	0.65	0.78	0.85	0.95
40	0.47	0.62	0.78	0.85	0.94
$Q_{piesi} = 600 \text{ p/h} / Q_{piesi} = 600 \text{ os./h}$					
G^B [s]	$P_{ak} = 0$	$P_{ak} = 1$	$P_{ak} = 2$	$P_{ak} = 3$	$P_{ak} = 4$
20	0.49	0.63	0.78	0.86	0.95
30	0.48	0.63	0.79	0.85	0.93
40	0.47	0.64	0.77	0.87	0.95

lacji P_{ak} (0 P, 1 P, 2 P, 3 P, 4 P). Dobrano program sygnalizacji tak, by ruch kolumnowy na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu kończył się w połowie przesuwania się kolejki pojazdów. Wyniki przeprowadzonych badań symulacyjnych zostały przedstawione w Tabl. 2.

Na podstawie przeprowadzonych badań można zauważyć, że nie występuje zależność pomiędzy funkcją $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$ a natężeniem pieszych (Q_{piesi}) czy długością sygnału zielonego dla kierunku B (G^B). Wyrażna jest natomiast zależność tej funkcji od pojemności powierzchni akumulacji. Im większa wartość pojemności powierzchni akumulacji, tym większe są wartości funkcji $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$. Ponieważ funkcja $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$ nie zależy od długości sygnału zielonego dla kierunku B oraz natężenia pieszych, zastąpiono ją współczynnikiem f_L zależnym jedynie od pojemności powierzchni akumulacji. Wartości współczynnika f_L otrzymane jako średnia uzyskanych wyników przedstawiono w Tabl. 3.

Na podstawie wyników badań przedstawionych w Tabl. 3 widać, że nawet powierzchnia akumulacji umożliwiająca postój czterech pojazdów relacji lewoskrętnej z wlotu C nie umożliwia wykorzystania wszystkich dostępnych odstępów czasu w potoku pojazdów na jezdni głównej.

Table 3. Values of the f_L coefficient
 Tablica 3. Wartości współczynnika f_L

Number of storage spaces in the median P_{ak} [P] [veh.] Pojemność powierzchni akumulacji P_{ak} [P]	Value of the f_L coefficient [-] Wartość współczynnika f_L [-]
0	0.46
1	0.64
2	0.77
3	0.86
4	0.95

As shown by the results given in Table 3, even available space for storage of four left-turning vehicles in the median does not enable full use of all the available gaps in the stream of vehicles on the main street. The lower the value of the f_L coefficient, the lower the proportion of gaps used by the left-turning vehicles from entry C among all the available gaps in the queue (gaps enabling joining the queue on the main street).

The number of vehicles from the left-turn movement from entry C joining the queue may be represented using the equation:

Im mniejsza jest wartość współczynnika f_L , tym mniejszy jest udział wykorzystywanych przez pojazdy relacji lewoskrętnej z wlotu C dostępnych (umożliwiających dołączenie się do kolejki pojazdów na jezdni głównej) odstępów czasu w kolejce pojazdów.

Liczbę pojazdów relacji lewoskrętnej z wlotu C dołączających się do kolejki można przedstawić za pomocą równania:

$$n_T^{CL} = n_T^{DP} \cdot f_L. \quad (16)$$

Przepustowość relacji lewoskrętnej z wlotu podporządkowanego C można obliczyć na podstawie zależności:

$$C^{CL} = n_T^{CL} \cdot \frac{3600}{T}, \quad (17)$$

gdzie:

C^{CL} – przepustowość relacji lewoskrętnej z wlotu podporządkowanego C [P/h],

n_T^{CL} – liczba pojazdów relacji lewoskrętnej z wlotu C dołączających się do kolejki podczas jednego cyklu [P],

T – długość cyklu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną [s].

3.4. OKREŚLENIE CZASU BLOKOWANIA SKRZYŻOWANIA Z PIERWSZEŃSTWEM PRZEJAZDU PRZEZ POJAZDY PORUSZAJĄCE SIĘ W KOLEJCE

Czas blokowania skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu przez pojazdy poruszające się w kolejce nie jest wykorzystywany bezpośrednio do określania przepustowości relacji dołączających się do kolejki pojazdów na jezdni głównej. Ma jednak wpływ na wielkości, które pozwalają wyznaczyć przepustowość pozostałych relacji na wlotach podporządkowanych (poza relacjami dołączającymi się do kolejki pojazdów) oraz przepustowość wlotów podporządkowanych.

Liczbę pojazdów znajdujących się w kolejce na odcinku od linii zatrzymania przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną a skrzyżowaniem z pierwszeństwem przejazdu (na jednym pasie ruchu) można obliczyć na podstawie zależności:

$$n_s = \frac{L_s}{l_p}, \quad (18)$$

gdzie:

L_s – odległość od linii zatrzymania przed skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną a skrzyżowaniem z pierwszeństwem przejazdu (Rys. 1) [m],

$$n_T^{CL} = n_T^{DP} \cdot f_L. \quad (16)$$

The capacity of the left-turn movement from the minor entry C may be calculated based on the relationship:

$$C^{CL} = n_T^{CL} \cdot \frac{3600}{T}, \quad (17)$$

where:

C^{CL} – capacity of the left-turn movement from the minor entry C [veh./h],

n_T^{CL} – the number of vehicles from the left-turn movement from entry C joining the queue during one cycle [veh.],

T – cycle length at the signalized intersection [s].

3.4. CALCULATION OF THE TIME IN WHICH THE INTERSECTION IS BLOCKED BY VEHICLES MOVING AHEAD IN THE QUEUE

The time in which the unsignalized intersection is blocked by vehicles moving ahead in the queue is not a value directly used in calculation of capacity of turning movements joining the queue. However, it influences some of the values which enable determination of capacity of other movements from the minor entries (apart from the movements joining the queue) as well as the total capacity of the minor entries.

The number of vehicles in the queue between the unsignalized intersection and the stop line of the signalized intersection (on a single lane) may be calculated from:

$$n_s = \frac{L_s}{l_p}, \quad (18)$$

where:

L_s – distance between the unsignalized intersection and the stop line of the signalized intersection (Fig. 1) [m],

l_p – average length of vehicle in the queue calculated from equation (5) [m].

Time intervals between the moments when successive vehicles start moving depend on the distance from the stop line. The investigations were conducted on several intersections in Wrocław and Opole. The obtained results of this parameter are presented in [39]. The average time intervals between the moments when successive vehicles

l_p – średnia długość pojazdu w kolejce obliczona wg wzoru (5) [m].

Odstępy czasu pomiędzy ruszaniem kolejnych pojazdów w kolejce są zależne od odległości od linii zatrzymania. Badania wykonane zostały na kilku skrzyżowaniach we Wrocławiu i Opolu. Wyniki badań tego parametru zostały przedstawione w [39]. Średnie odstępy czasu pomiędzy ruszaniem kolejnych pojazdów w kolejce w zależności od odległości od linii zatrzymania przedstawiono na Rys. 5.

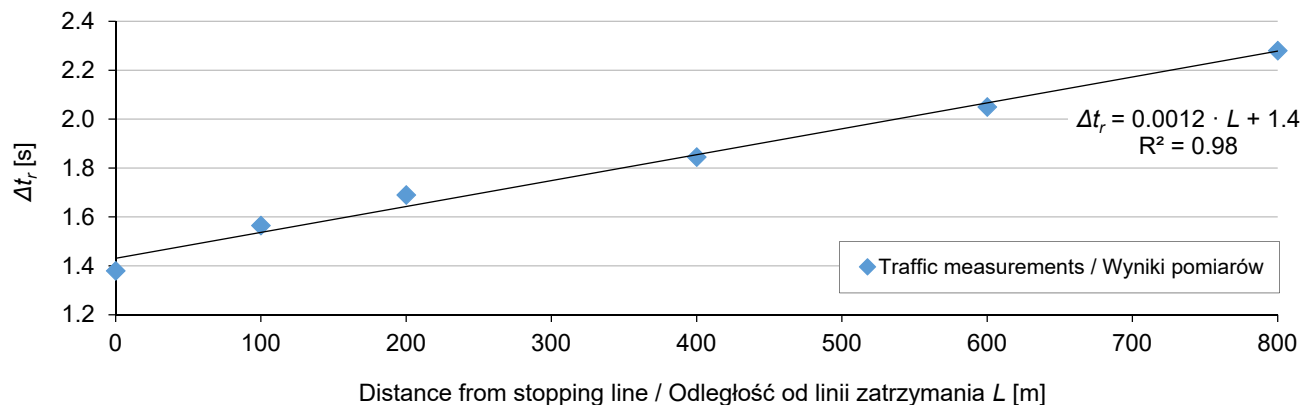


Fig. 5. Average time intervals between the moments in which successive vehicles in the queue start moving
Rys. 5. Średnie odstępy czasu pomiędzy ruszaniem kolejnych pojazdów w kolejce

Średni odstęp czasu pomiędzy ruszaniem pojazdów w kolejce wzrasta liniowo wraz ze wzrostem odległości od linii zatrzymania. Dokonano aproksymacji zależności funkcją liniową:

$$\Delta t_r = 0,0012 \cdot L + 1,4, \quad (19)$$

gdzie:

Δt_r – średni odstęp czasu pomiędzy ruszaniem kolejnych pojazdów w kolejce zależny od odległości od linii zatrzymania [s],

L – odległość od linii zatrzymania [m].

Na podstawie zależności (19) można określić średni odstęp czasu pomiędzy ruszaniem kolejnych pojazdów w kolejce znajdujących się na odcinku pomiędzy skrzyżowaniem z sygnalizacją świetlną a skrzyżowaniem z pierwszeństwem przejazdu. Przedstawia go zależność:

$$\Delta t_r^s = 0,0012 \cdot \frac{L_s}{2} + 1,4, \quad (20)$$

Czas ruszenia kolejki pojazdów na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu można opisać zależnością (21).

in the queue started moving are shown in Fig. 5 in relation to the distance from the stop line.

The average time interval between starting vehicles in the queue increases linearly with an increase in the distance from the stop line. The relationship was expressed using linear approximation:

$$\Delta t_r = 0.0012 \cdot L + 1.4, \quad (19)$$

where:

Δt_r – average time interval between the moments when successive vehicles in the queue start moving, depending on the distance from the stop line [s],

L – distance from the stop line [m].

Based on equation (19), it is possible to calculate the mean value of the starting time interval between the vehicles in the queue along the entire distance from the unsignalized intersection to the signalized intersection. It is expressed by the relationship:

$$\Delta t_r^s = 0.0012 \cdot \frac{L_s}{2} + 1.4, \quad (20)$$

Time after which the queue on the unsignalized intersection starts moving ahead may be expressed by equation (21). This time is counted from the moment when the green signal commences for the stream K2.

$$t_r^s = n_s \cdot \Delta t_r^s. \quad (21)$$

Headway between the vehicles moving in the queue depends on the distance from the stop line. The research was

Czas ten liczony jest od momentu zapalenia sygnału zielonego dla potoku K2.

$$t_r^s = n_s \cdot \Delta t_r^s. \quad (21)$$

Odstępy czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce zależą od odległości od linii zatrzymania. Badania zostały przeprowadzone na kilku skrzyżowaniach we Wrocławiu i Opolu. Wyniki badań tego parametru zostały opisane w [39]. Średnie odstępy czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce w zależności od odległości od linii zatrzymania zostały przedstawione na Rys. 6.

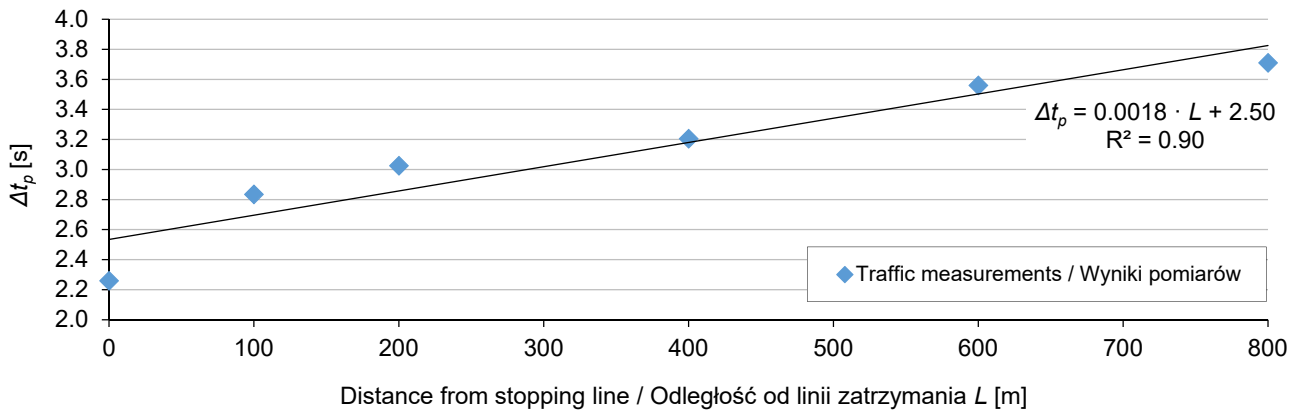


Fig. 6. Average headway between vehicles moving in the queue
Rys. 6. Średnie odstępy czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce

Odstępy czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce rosną wraz ze wzrostem odległości od linii zatrzymania. Wzrost ten jest liniowy. Dokonano aproksymacji zależności funkcją liniową:

$$\Delta t_p = 0,0018 \cdot L + 2,50, \quad (22)$$

gdzie:

Δt_p – średni odstęp czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce zależny od odległości od linii zatrzymania [s],

L – odległość od linii zatrzymania [m].

Czas blokowania skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu przez pojazdy poruszające się w kolejce można w przybliżeniu przedstawić za pomocą równania:

$$t_b = n_0 \cdot \Delta t_p, \quad (23)$$

conducted on several intersections in Wrocław and Opole. The results were described in [39]. Average headway values between vehicles moving in the queue, depending on the distance from the stop line, are shown in Fig. 6.

Headway between the vehicles moving in the queue increases with an increase in the distance from the stop line. The trend is linear. The relationship was described using linear approximation:

$$\Delta t_p = 0.0018 \cdot L + 2.50, \quad (22)$$

where:

Δt_p – average headway between vehicles moving in the queue depending on the distance from the stop line [s],

L – distance from the stop line [m].

The time during which the unsignalized intersection is blocked by vehicles moving ahead in the queue may be approximately expressed by the equation:

$$t_b = n_0 \cdot \Delta t_p, \quad (23)$$

where:

n_0 – the average number of vehicles leaving the entry of signalized intersection on a single lane during one cycle, according to equation (1) [veh.],

Δt_p – average headway between vehicles moving in the queue at the distance L_s from the stop line [s].

gdzie:

n_0 – średnia liczba pojazdów opuszczających wlot skrzyżowania z sygnalizacją świetłą z jednego pasa ruchu podczas jednego cyklu obliczona wg wzoru (1) [P],

Δt_p – średni odstęp czasu pomiędzy pojazdami poruszającymi się w kolejce w odległości L_s od linii zatrzymania [s].

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W artykule przedstawiono autorską metodę określenia przepustowości relacji podporządkowanych dołączających się do kolejki pojazdów na jezdni głównej. Zaproponowany sposób obliczenia przepustowości relacji podporządkowanych składa się z kilku etapów. Na początku wyznaczono długość pasa zwalnianą przez pojazdy opuszczające skrzyżowanie z sygnalizacją świetłą. Właśnie ta długość determinuje liczbę pojazdów, jaka w każdym cyklu może przejechać przez skrzyżowanie z pierwszeństwem przejazdu – zarówno na jezdni głównej, jak i z wlotów podporządkowanych. W drugim etapie określono przepustowość relacji prawoskrętnej C^{DP} dołączającej się do kolejki pojazdów. Wykonano badania symulacyjne, aby uwzględnić interakcje zachodzące pomiędzy kierującymi pojazdami na jezdni głównej oraz pieszymi chcącymi przejść przez jezdnię. W trzecim etapie obliczono przepustowość relacji lewoskrętnej C^{CL} , dołączającej się do kolejki pojazdów. Przepustowość tej relacji powiązano z przepustowością relacji prawoskrętnej C^{DP} poprzez funkcję zależną od długości sygnału zielonego, natężenia ruchu pieszego oraz powierzchni akumulacji na skrzyżowaniu z pierwszeństwem przejazdu $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$. Na podstawie przeprowadzonych badań symulacyjnych zauważono, że widoczna jest jedynie wyraźna zależność tej funkcji od powierzchni akumulacji. W ostatnim etapie określono czas ruszenia kolejki pojazdów oraz czas blokowania skrzyżowania z pierwszeństwem przejazdu przez poruszającą się kolejkę pojazdów. Wielkości te pozwalają określić przepustowość pozostałych relacji na wlotach podporządkowanych. Równocześnie umożliwiają obliczenie przepustowości wlotów podporządkowanych w sytuacji, gdy na jezdni głównej utrzymuje się kolejka pojazdów.

Zaproponowany sposób obliczania przepustowości relacji podporządkowanych odnosi się tylko do sytuacji, gdy skrzyżowanie jest czterowlotowe, a na jezdni głównej występują dwa pasy ruchu w każdym kierunku. Przy takiej

4. SUMMARY AND CONCLUSIONS

The article presents the author's own method of determination of capacity of turning movements from minor entries when turning vehicles join the queue of vehicles on the main street. The proposed method of capacity calculation consists of several steps. First, the length of lane vacated by the vehicles leaving the signalized intersection was calculated. This value determines the number of vehicles that may pass through the unsignalized intersection in a single cycle – both coming from the main street and from the minor entries. Second step consisted in determination of capacity of the right-turn movement C^{DP} joining the queue. Simulation analysis was performed in order to take into account the interactions between drivers on the main street and pedestrians intending to cross the main street. In the third step, capacity of the left-turn movement C^{CL} joining the queue was calculated. This capacity was related to the capacity of the right-turn movement C^{DP} , using a function dependent on green time, volume of pedestrian traffic and the number of storage spaces in the center of the unsignalized intersection $f(G^B, Q_{piesi}, P_{ak})$. Based on the performed simulation analyses, it was noted that only dependence on the number of storage spaces in the center median is evident for the function. The last step consisted in calculation of the time after which the queue starts moving through the unsignalized intersection and the time during which the intersection is blocked by the vehicles moving ahead in the queue. These values enable determination of capacity of the remaining movements from the minor entries. They also enable calculation of capacity of the minor entries when there is a queue of vehicles on the main street.

The proposed method of capacity calculation of movements from minor entries is applicable only in the case of four-way intersections with two lanes in each direction on the main street. With such traffic arrangement, it was assumed for simplification of calculations that the vehicles turning right from the minor entry join the queue only on the right lane of the main street, while the vehicles turning left from the opposite minor entry join the queue only on the left lane of the main street.

While the method was prepared for calculations of capacity of minor movements on four-way intersections, it may be also used for three-way intersections with one or two lanes on the main street. It may be useful for three-way intersections both when vehicles joining the queue

organizacji ruchu założono dla uproszczenia obliczeń, że pojazdy relacji prawoskrętnej podporządkowanej wykorzystują prawy pas ruchu na jezdni głównej, zaś pojazdy z relacji lewoskrętnej podporządkowanej wykorzystują lewy pas ruchu na jezdni głównej.

Choć metoda ta służy do obliczania przepustowości relacji podporządkowanych na skrzyżowaniach czterowłotowych, może być stosowana również w przypadku skrzyżowań trójwłotowych z jednym lub dwoma pasami na jezdni głównej. Może być użyteczna zarówno w sytuacji, gdy dołączanie następuje jako prawoskręt (wtedy nie ma potrzeby obliczania przepustowości relacji lewoskrętnej) albo lewoskręt (wtedy konieczne jest uwzględnienie „wirtualnego wlotu”, z którego wykonywana jest relacja prawoskrętna).

Przeprowadzona została również weryfikacja tej metody na rzeczywistych skrzyżowaniach we Wrocławiu i Katowicach. Weryfikacja ta została szczegółowo opisana w pracy [35] i pokazuje kilkuprocentowe różnice pomiędzy obliczeniami a wykonanymi badaniami ruchu. Z powodu ograniczeń publikacyjnych nie przedstawiono jej w niniejszym artykule.

Obliczenia wykonywane w przedstawionej metodzie określenia przepustowości relacji podporządkowanych dołączających się do kolejki pojazdów na jezdni głównej są stosunkowo proste. Metoda uwzględnia wszystkie czynniki, które mają wpływ na przepustowość tych relacji. Zostały one określone na podstawie licznych badań ruchu oraz przeprowadzonych badań symulacyjnych. Zastosowane założenia i uproszczenia nie pogarszają skuteczności metody.

Analizowane w niniejszym artykule skrzyżowania bez sygnalizacji świetlnej należą do najbardziej niebezpiecznych typów skrzyżowań. W związku z tym miejscy inżynierowie ruchu mogą decydować o wprowadzeniu zakazu dla relacji lewoskrętnej, zastosowaniu nakazu jazdy w prawo na wlotach podporządkowanych lub wprowadzeniu sygnalizacji świetlnej. Kilka spośród skrzyżowań, na których autor prowadził badania ruchu, z biegiem czasu zostało wyposażonych w sygnalizację świetlną.

turn right from the minor entry (then calculations of left-turn movement capacity are not necessary) and when the vehicles turn left (then it is necessary to introduce an opposite “virtual entry” with right-turn movement joining the queue).

The method was verified on real intersections in Wrocław and Katowice. Verification was described in detail in [35]. It showed relative differences of several percent between the calculations and the conducted traffic survey. Due to publishing limitations, it will not be discussed in detail in this article.

The calculations performed in the proposed method are relatively simple. The method incorporates all the factors that affect the capacity of movements joining the queue on the main street. They were determined based on extensive field investigations and simulation analyses. The adopted assumptions and simplifications do not reduce the effectiveness of the method.

The unsignalized intersections analyzed in this paper belong to the most dangerous types of intersections. Due to this fact, city traffic engineers may prohibit left turns, introduce mandatory right turns for the minor entries or install traffic signals on the intersection. Several of the unsignalized intersections that were analyzed by the author have been changed into signalized intersections.

The presented methodology is not universal. While it pertains only to a specific case, it may constitute the basis of a broader method of capacity calculation. Improvements may be introduced in the course of further research to generalize the results and obtain a universal method. The factors whose influence should be taken into account include: pedestrian traffic crossing the minor entries, various arrangements of pedestrian crossings on the main street, different numbers of pedestrians on particular crossings, selection of lanes by the drivers joining the queue, various types of control at the signalized intersection (directional phases, conditional right-turn arrow) and separated lanes for turning movements.

Przedstawiona metodologia nie jest uniwersalna. Odnosi się tylko do jednego szczególnego przypadku, ale stanowi pewne podwaliny pod szerszą metodę obliczania przepustowości. W toku dalszych prac mogą zostać wprowadzone udoskonalenia, które umożliwią uogólnienie wyników i opracowanie uniwersalnej metody. Przede wszystkim uwzględnić należy wpływ pieszych na wlotach podporządkowanych, różne konfiguracje przejść dla pieszych na jezdni głównej, różną liczbę pieszych na poszczególnych przejściach, rozkład zajmowania pasów ruchu przy dołączaniu się do kolejki pojazdów oraz różne rodzaje sterowania na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną (sterowanie kierunkowe, sygnał warunkowego skrętu w prawo) i wpływ wydzielonych pasów ruchu dla relacji skrajnych.

BIBLIOGRAFIA / REFERENCES

- [1] *Holland E.N., Woods A.W.*: A continuum model for the dispersion of traffic on two-lane roads. *Transportation Research Part B: Methodological*, **31**, 6, 1997, 473-485
- [2] *Qiao F., Yang H., Lam W.H.K.*: Intelligent simulation and prediction of traffic flow dispersion. *Transportation Research Part B: Methodological*, **35**, 9, 2001, 843-863
- [3] *Nagatani T.*: Dispersion and scaling of fluctuating vehicles through a sequence of traffic lights. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **361**, 2, 2006, 619-629
- [4] *Mathew J., Thomas H., Sharma A., Devi L., Rilett L.*: Studying platoon dispersion characteristics under heterogeneous traffic in India. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, **104**, 2013, 422-429
- [5] *Nagatani T.*: Traffic dispersion through a series of signals with irregular split. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **442**, 2016, 122-130
- [6] *Yao Z., Zhao B., Qin L., Jiang Y., Ran B., Peng B.*: An efficient heterogeneous platoon dispersion model for real-time traffic signal control. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **539**, 2020, article 122982
- [7] Ustawa z dnia 20 czerwca 1997 roku. Prawo o ruchu drogowym. Dz. U. 1997 nr 98 poz. 602
- [8] *Gasz K.*: Skłonność kierowców do udzielania pierwszeństwa pieszym na przejściach przez jezdnie. *Transport Miejski i Regionalny*, **11**, 2010, 8-10
- [9] *Chen Q., Wang Y.*: Cellular automata (CA) simulation of the interaction of vehicle flows and pedestrian crossings on urban low-grade uncontrolled roads. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **432**, 2015, 43-57
- [10] *Li X., Sun J.Q.*: Effects of vehicle-pedestrian interaction and speed limit on traffic performance of intersections. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **460**, 2016, 335-347
- [11] *Lu L., Ren G., Wang W., Chan C.Y., Wang J.*: A cellular automaton simulation model for pedestrian and vehicle interaction behaviors at unsignalized mid-block crosswalks. *Accident Analysis and Prevention*, **95**, B, 2016, 425-437
- [12] *Obeid H., Abkarian H., Abou-Zeid M., Kaysi I.*: Analyzing driver-pedestrian interaction in a mixed-street environment using a driving simulation. *Accident Analysis and Prevention*, **108**, 2017, 56-65
- [13] *Thakur S., Biswas S.*: Assessment of pedestrian-vehicle interaction on urban roads: A critical review. *Archives of Transport*, **51**, 3, 2019, 49-63
- [14] *Brilon W., Wu N.*: Capacity at unsignalized two-stage priority intersections. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **33**, 3-4, 1999, 275-289
- [15] *Troutbeck R.J., Kako S.*: Limited priority merge at unsignalized intersections. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **33**, 3-4, 1999, 291-304
- [16] *Wu N.*: Capacity of shared-short lanes at unsignalized intersections. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **33**, 3-4, 1999, 255-274
- [17] *Wu N.*: A universal procedure for capacity determination at unsignalized (priority-controlled) intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, **35**, 6, 2001, 593-623
- [18] *Pollatschek M.A., Polus A., Livneh M.*: A decision model for gap acceptance and capacity at intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, **36**, 7, 2002, 649-663
- [19] *Chevallier E., Leclercq L.*: A macroscopic theory for unsignalized intersections. *Transportation Research Part B: Methodological*, **41**, 10, 2007, 1139-1150
- [20] *Li H., Tian Z., Deng W.*: Capacity of TWSC intersection with multilane approaches. *Procedia Social and Behavioral Sciences*, **16**, 2011, 664-675
- [21] *Prasetijo J., Pour M.H., Ghadiri S.M.R.*: Capacity of unsignalized intersections under mixed traffic conditions. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, **16**, 2011, 676-685
- [22] *Prasetijo J., Ahmad H.*: Capacity analysis of unsignalized intersection under mixed traffic conditions. *Procedia – Social and Behavioral Sciences*, **43**, 2012, 135-147
- [23] *Guler S.I., Menendez M.*: Methodology for estimating capacity and vehicle delays at unsignalized multimodal intersections. *International Journal of Transportation Science and Technology*, **5**, 4, 2016, 257-267

- [24] *Bogdanović V., Ruškić N., Basarić V., Tanackov I.*: Capacity analysis procedure for four-leg non-standard unsignalised intersections. *Promet – Traffic & Transportation*, **29**, 5, 2017, 543-550
- [25] *Pitlova E., Kocianova A.*: Determination of priority stream volumes for capacity calculation of minor traffic streams for intersections with bending right-of-way. *Transportation Research Procedia*, **40**, 2019, 875-882
- [26] Transportation Research Board. *Highway Capacity Manual*. 6th ed. Washington DC. National Research Council, 2016
- [27] *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań bez sygnalizacji świetlnej. Instrukcja obliczania.* Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2004
- [28] *Brilon W., Koenig R., Troutbeck R.J.*: Useful estimation procedures for critical gaps. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, **33**, 3-4, 1999, 161-186
- [29] *Chodur J.*: Estimation of the critical gaps determining performance of priority type intersection. *Archives of Transport*, **13**, 1, 2001, 15-28
- [30] *Macioszek E.*: Graniczny odstęp czasu jako jeden z parametrów procesu decyzyjnego w obsłudze pojazdów z wlotów ronda. *Transport Miejski i Regionalny*, 2, 2009, 8-16
- [31] *Szczuraszek T., Macioszek E.*: Analiza rozkładów odstępów czasu pomiędzy pojazdami na obwodni małych rond. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **9**, 3, 2010, 87-99
- [32] *Nagalla R., Pothuganti P., Pawar D.S.*: Analyzing gap acceptance behavior at unsignalized intersections using suport vector machines, decision tree and random forests. *Procedia Computer Science*, **109**, 2017, 474-481
- [33] *Tanackov I., Deretić N., Bogdanović V., Ruškić N., Jović S.*: Safety time in critical gap of left turn manoeuvre from priority approach at TWSC unsignalized intersecions. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, **505**, 2018, 1196-1211
- [34] *Hazim N., Bazlamit S.M., Salem Z.A., Alghazawi O., Odeh I.*: Determination of critical gap and follow-up time at roundabouts in Jordan. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **18**, 3, 2019, 227-234, DOI: 10.7409/rabdim.019.015.
- [35] *Gasz K.*: Modelowanie ruchu w sieci ulic w warunkach ograniczonej przepustowości skrzyżowań. Rozprawa doktorska, Instytut Inżynierii Lądowej Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2007, <https://dbc.wroc.pl/dlibra/publication/1562/edition/1760?language=pl>, 07.02.2020
- [36] *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Instrukcja obliczania.* Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa, 2004
- [37] *Gasz K.*: Traffic simulation at unsignalized intersection in case of congestion on major street caused by an adjacent traffic signal. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **19**, 3, 2020, 211-224, DOI: 10.7409/rabdim.020.014
- [38] *Gasz K., Kruszyna M.*: Analizy procesu zgłoszeń pieszych do przejścia przez jezdnię. *Roads and Bridges - Drogi i Mosty*, **3**, 2, 2004, 41-64
- [39] *Gasz K.*: Wpływ długości kolejki na wlocie skrzyżowania na odstęp czasu pomiędzy pojazdami, w: *Problemy naukowo-badawcze budownictwa*. Tom V. Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok, 2008, 173-179