

# PRZEPUSTOWOŚĆ SKRZYŻOWANIA JAKO PARAMETR DECYDUJĄCY O WARUNKACH RUCHU NA SKRZYŻOWANIACH WYPOSAŻONYCH W SYGNALIZACJĘ ŚWIETLNA

Krzysztof ŁAKOTA<sup>1</sup>

## 1. WPROWADZENIE

Obecna tendencja w ruchu drogowym zmierza do maksymalizacji wykorzystania powierzchni drogi jako czynnika mającego decydujący wpływ na warunki ruchowe w obszarach zurbanizowanych na odcinkach dróg miejskich. Warunki wysokiej kongestii drogowej w miejscach o niedostatecznej przepustowości przekraczają sprawność skrzyżowań stanowiących „wąskie gardła”, skutkując zatrzymaniem ruchu w obszarze przylegającym do skrzyżowania. W takich przypadkach analizy ruchowe w obszarach miejskich, będące obowiązkiem każdego z podmiotów zarządzających drogami, determinują obciążenie sieci drogowej na pomierzonych węzłach. Obecne zalecenia rekomendowane przez Generalną Dyрекcję Dróg Krajowych i Autostrad w kwestii metodyki obliczania przepustowości wprowadzają dużą liczbę parametrów niezbędnych do analizy warunków ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. W artykule przybliżono miary efektywności ruchu, które w sposób znaczący wpływają na przepustowość skrzyżowań.

## 2. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PRZEPUSTOWOŚĆ

Do obliczania przepustowości skrzyżowania z sygnalizacją świetlną oraz oceny warunków ruchu na skrzyżowaniu jest stosowanych kilka metod, bazujących głównie na wynikach pomiarów natężeń nasycenia [1]. Metodyka przeprowadzania analiz ruchu opiera się na wspólnych założeniach m. in. metody amerykańskiej, australijskiej, kanadyjskiej oraz niemieckiej. Metoda polska [2] wykorzystuje wiele elementów metod zagranicznych a najbardziej zbliżona jest do amerykańskiej. W powyższych metodach (sterowanie stałoczasowe i akomodacyjne) uwzględnia się następujące czynniki wpływające na przepustowość:

- **geometria skrzyżowania:**
  - liczba wlotów,
  - liczba pasów ruchu, szerokość i położenie względem chodnika,
  - długość pasów dla relacji skrętu w lewo lub w prawo,
  - pochylenie wlotów,
  - promień wyokrąglenia wewnętrznych krawędzi pasów,
  - lokalizacja przejść dla pieszych,
  - lokalizacja przystanków autobusowych;
- **organizacja ruchu:**
  - sterowanie (stałoczasowe lub akomodacyjne),
  - dopuszczalne kierunki ruchu na pasach,
  - kolizyjność przebiegu relacji w fazach ruchu,

---

<sup>1</sup> mgr inż. Krzysztof Łakota, Miejski Zarząd Dróg, ul. Targowa 1, 35-064 Rzeszów, [krzysztof.lakota@mzd.ereszow.pl](mailto:krzysztof.lakota@mzd.ereszow.pl)

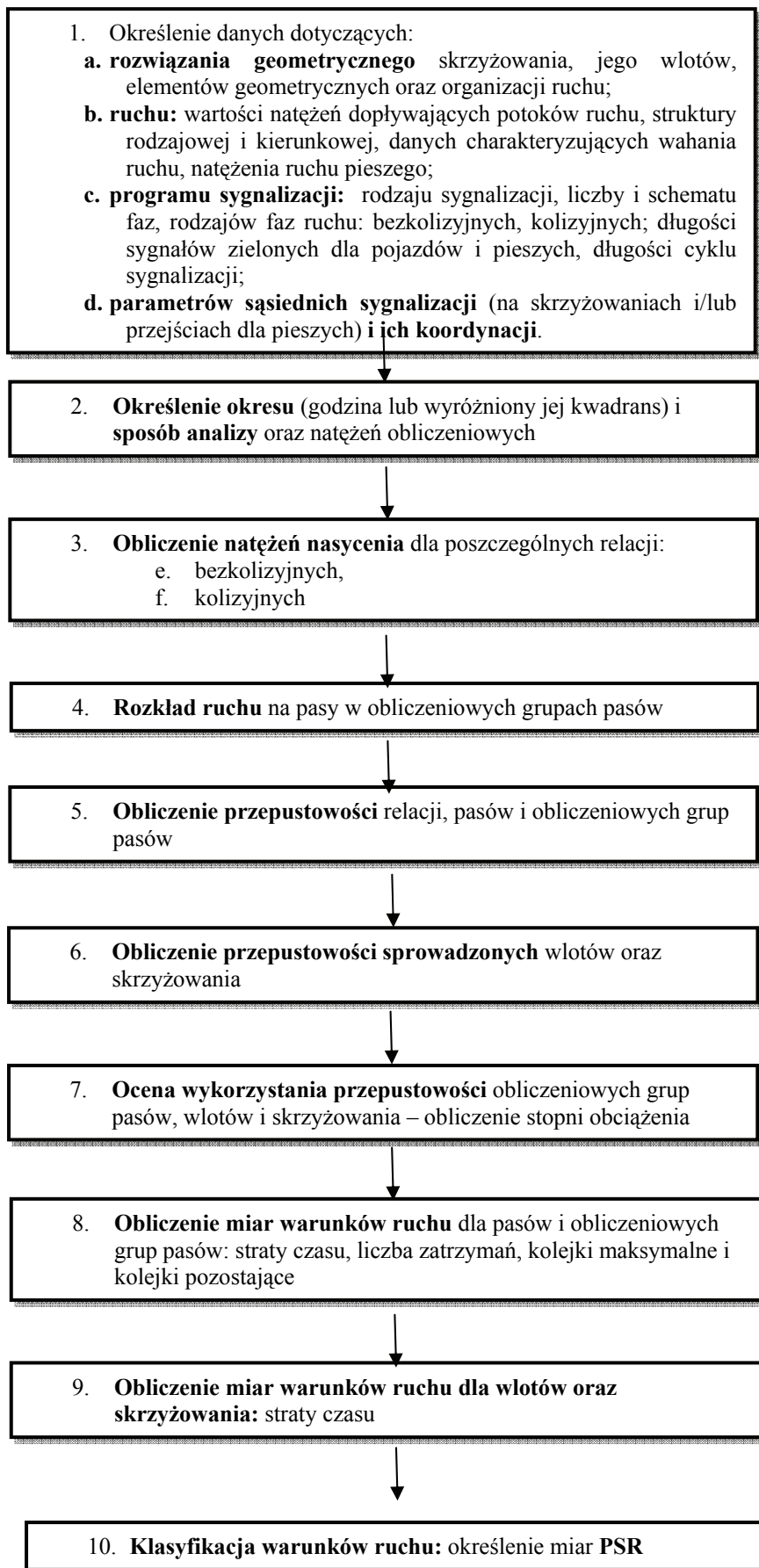
- przebieg relacji podczas nadawania sygnału dopuszczającego skręcanie w kierunku wskazanym strzałką,
- długość cyklu sygnalizacji,
- maksymalne długości sygnałów zielonych w fazach sygnalizacyjnych,
- czasy międzyzielone;
- **pomierzone natężenia ruchu:**
  - natężenia ruchu pojazdów dla poszczególnych relacji w godzinie charakterystycznej dla danego okresu sterowania,
  - udział pojazdów ciężkich,
  - udział poszczególnych relacji w natężeniu ruchu,
  - zmienność natężenia ruchu w godzinie,
  - natężenie ruchu pieszego,
  - natężenia ruchu autobusów na wlocie i wylocie skrzyżowania;
- **sąsiednie skrzyżowania (w przypadku korytarzy koordynowanych liniowo):**
  - lokalizacja skrzyżowania lub przejść dla pieszych z sygnalizacją,
  - parametry programów sterowania, w tym [3]: długość cyklu, układ faz, długości sygnałów zielonych, offset pomiędzy sygnałami zielonymi na skrzyżowaniu sąsiednim i analizowanym.

### 3. METODOLOGIA ANALIZ PRZEPUSTOWOŚCI

Do analizy skrzyżowań sterowanych stałoczasową, jak również akomodacyjną i acykliczną sygnalizacją świetlną wykorzystujemy metodę stosowaną w naszym kraju, która stanowi kompilację wymienionych wyżej metod zagranicznych. Przedstawiona analiza przepustowości i warunków ruchu może mieć na celu [2]:

- 1) sprawdzenie przepustowości i ocenę warunków ruchu przy znanym rozwiązaniu geometrycznym, znanych natężeniach ruchu oraz typie i programie sygnalizacji,
- 2) określenie natężeń krytycznych, przy którym będą jeszcze zapewnione warunki ruchu (poziom swobody ruchu *PSR*),
- 3) projektowanie programu sygnalizacji przy znanych natężeniach i rozwiązaniu geometrycznym,
- 4) ustalenie typu skrzyżowania przy zadanych dopuszczalnych warunkach ruchu (*PSR*).

Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną może mieć zastosowanie w realizacji ww. celów. Z uwagi na przeznaczenie metody głównie do obliczeń przepustowości i oceny warunków ruchu, przedstawiona metodologia odnosi się do przypadku (1), dla którego na rys. 1 przedstawiono schemat procedury postępowania.



Rys. 1. Schemat metodologii analiz przepustowości [2]

#### 4. CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA PRZEPUSTOWOŚĆ

W badaniach empirycznych wykazano wiele czynników mających decydujący wpływ podczas analizy ruchowej warunków na skrzyżowaniu, stosując metodę przedstawioną na rys. 1. Zależności i znaczenie poszczególnych zmiennych przedstawiono poniżej.

Przepustowość  $C$  [P/h] w ogólnym ujęciu zależy od wartości natężenia nasycenia  $S$  [P/hz] i parametrów programu sygnalizacji  $G_e$  i  $T$ . Pomiedzy przepustowością a natężeniem nasycenia zachodzi następujący związek:

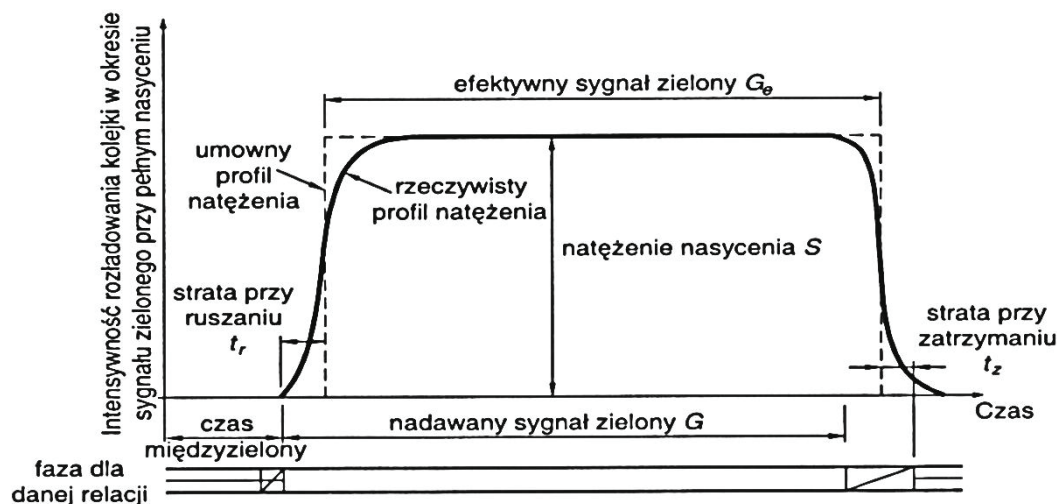
$$C = S \cdot \frac{G_e}{T} \quad [\text{P/h}] \quad (1)$$

gdzie:

- $G_e$  - długość efektywnego sygnału zielonego [s],
- $T$  - długość cyklu sygnalizacji [s],
- $\frac{P}{h}$  - liczba pojazdów na godzinę [-]
- $\frac{h}{P}$  - liczba pojazdów rzeczywistych na godzinę sygnału zielonego w cyklu [-].

##### Efektywny sygnał zielony i czas tracony w fazie sygnalizacyjnej

Przebieg strumienia ruchu sterowanego sygnalizacją może być modelowany przy pomocy przedziałów czasu zwanych efektywnym sygnałem czerwonym  $R_e$  i efektywnym sygnałem zielonym  $G_e$ . Podczas efektywnego sygnału zielonego pojazdy przejeżdżają linię zatrzymań ze stałym natężeniem nasycenia tak długo, jak długo utrzymuje się kolejka pojazdów, a przy braku kolejki z natężeniem równym natężeniu dopływających pojazdów. Przy utrzymującej się kolejce pojazdów wykorzystuje się długość efektywnego sygnału zielonego. Z tym zagadnieniem wiąże się bezpośrednio profil rzeczywisty rozładowania kolejki. Praktycznie, podczas obserwacji ruchu kołowego czas zjazdu kolejki pojazdów nie pokrywa się z długością nadawanego sygnału zielonego, co ilustruje rys. 2.



Rys. 2. Rzeczywisty profil natężenia nasycenia [2]

Związek pomiędzy długością zielonego sygnału efektywnego  $G_e$  i długością rzeczywistego sygnału zielonego nadawanego w danej fazie ruchowej  $G$  opisuje zależność:

$$G_e = G + Z - (t_r + t_z) \quad [s] \quad (2)$$

gdzie:

- $G$  - długość sygnału zielonego [s],  
- długość sygnału żółtego [s],  
 $t_r$  - czas tracony na początku sygnału zielonego [s],  
 $t_z$  - czas tracony na końcu sygnału żółtego [s].

Różnorodność dynamiki jazdy kierowców skutkuje o przebiegu strumienia ruchu, przy uwzględnieniu czasów traconych na początku sygnału zielonego  $t_r$  i na końcu sygnału żółtego  $t_z$ . W warunkach ruchu swobodnego przyjmuje się, że  $(t_r + t_z) = 2,0 [s]$  natomiast w przypadku skrzyżowań rozległych charakteryzujących się dużą powierzchnią tarczy skrzyżowania s].

Istotą czynników charakteryzujących ruch drogowy jest natężenie nasycenia, które odpowiada maksymalnemu możliwemu odpływowi pojazdów z kolejki na pasie ruchu w czasie sygnału zielonego. W związku z różnorodnością geometrii skrzyżowań natężenia nasycenia wylicza się dla poszczególnych relacji.

Natężenie nasycenia dla relacji na wprost  $S_w$ :

$$S_w = [S_0 + 200 \cdot (w - 3,5) - 30 \cdot \delta_i \cdot i] \cdot \frac{1}{1 + u_c} \quad [P/hz] \quad (3)$$

gdzie:

- $S_0$  - wyjściowe natężenie nasycenia [E/hz]; gdy relacja na wprost korzysta sama z pasa lub wspólnie z inną relacją bezkolizyjną  $S_0 = 1900 E/hz$ , zaś gdy relacja na wprost korzysta ze wspólnego pasa z relacją skrętną o kolizyjnym przebiegu w danej fazie sygnalizacji  $S_0 = 1700 E/hz$ ,  
 $w$  - szerokość pasa ruchu [m],  
 $i$  - średnie pochylenie wlotu [%],  
 $\delta_i$  - wskaźnik pochylenia [-],  
 $u_c$  - udział pojazdów ciężkich w ruchu [-],  
 $\frac{E}{hz}$  - liczba pojazdów umownych na godzinę sygnału zielonego w cyklu [-],  
 $\frac{P}{hz}$  - liczba pojazdów rzeczywistych na godzinę sygnału zielonego w cyklu [-].

Natężenie nasycenia bezkolizyjnej relacji skrętnej  $S_r$ :

$$S_r = [S_0 + 80 \cdot (w - 3,5) - 30 \cdot \delta_i \cdot i - 160 \cdot \delta_k - 75 \cdot \delta_t] \cdot \frac{10^{-3} \cdot R + 1,025}{(1 + \frac{2}{R})} \cdot \frac{1}{1 + u_c} \quad [P/hz] \quad (4)$$

gdzie:

- $i$  - średnie pochylenie wlotu na odcinku 30m przed linią zatrzymania [%],  
 $\delta_k$  - wskaźnik położenia pasa [-],  
 $\delta_t$  - wskaźnik przejazdu przez torowisko tramwajowe [-],  
 $R$  - promień skrętu [m],  
- pozostałe zmienne jak we wzorze (3).

Natężenie nasycenia kolizyjnej relacji w lewo  $S_L$ :

$$S_L = [S_{Lg} + S_{Lm} - \Delta S_{Lp}] \cdot \frac{1}{1 + u_c} \quad [\text{P/hz}] \quad (5)$$

gdzie:

- $S_{Lg}$  - natężenie nasycenia w lukach strumienia priorytetowego [E/hz],
- $S_{Lm}$  - natężenie nasycenia wynikające ze zjazdów pojazdów w czasie międzyzielonym [E/hz],
- $S_{Lp}$  - poprawka uwzględniająca wpływ pieszych [E/hz],
- pozostałe zmienne jak we wzorze (3).

Natężenie nasycenia relacji skrętnej kolizyjnej z ruchem pieszym  $S_r$ :

$$S_r = S_0 \cdot f_p \cdot \frac{1}{1 + u_c} \quad [\text{P/hz}] \quad (6)$$

gdzie:

- $S_0$  - wyjściowe natężenie nasycenia [E/hz];  $S_0 = 1450$  [E/hz],
- $f_p$  - współczynnik uwzględniający wpływ ruchu pieszego,
- pozostałe zmienne jak we wzorze (3).

Natężenie nasycenia relacji podczas sygnału dopuszczającego skręcanie w kierunku wskazanym strzałką wyznaczamy z zależności:

$$S_{G_{ss}} = \frac{S \cdot G_s + S_{ss} \cdot G_{ss}}{G_s + G_{ss}} \quad [\text{P/hz}] \quad (7)$$

gdzie:

- $S_{ss} = 1070 \cdot \frac{1}{1 + u_c}$  - natężenie nasycenia relacji skrętnej podczas nadawania sygnału dopuszczającego skręcanie w kierunku wskazanym strzałką [E/hz],
- $G_{ss}$  - długość sygnału zielonego podczas nadawania sygnału dopuszczającego skręcanie w kierunku wskazanym strzałką [s],
- pozostałe zmienne jak we wzorze (3).

## 5. CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA MIAR WARUNKÓW RUCHU

Dla przeprowadzanej metodologii analizy przepustowości przedstawionej na rys. 1 dużą rolę odgrywają warunki ruchu panujące na skrzyżowaniu. Z zatrzymaniami i stratami czasu związana jest nieodłącznie obecność kolejki pojazdów. Straty czasu, liczba zatrzymań i długość kolejek pojazdów są miarami bezpośrednio odczuwalnymi przez kierowców. Wyznaczenie ich wartości umożliwia wyznaczenie innych miar oceny jakości rozwiązania skrzyżowania z sygnalizacją świetlną i jego funkcjonowania, takich jak zużycie paliwa, emisja spalin, poziom hałasu, czy koszty ruchu.

Analizując straty czasu mamy na myśli czas potrzebny na przejechanie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną w porównaniu z czasem przejazdu przez skrzyżowanie bez zakłóceń. W ocenie warunków ruchu są stosowane średnie ogólne straty czasu  $d_{gr}$  uwzględniające straty opóźnienia przy dojeździe do kolejki i straty zatrzymania pojazdu w kolejce. Średnie straty czasu przypadające na pojazd w obliczeniowej grupie pasów, w przyjętym okresie analizy  $f_a$ , szacuje się według następującej zależności:

$$d_{gr} = f_k \cdot d_1 + d_2 \quad [\text{s/P}] \quad (8)$$

gdzie:

- $d_1$  - straty czasu wynikające z zatrzymań na sygnale czerwonym [s],
- $d_2$  - straty czasu wynikające z losowych wahań ruchu i okresowych przeciążeń obliczeniowych grup pasów [s],
- $\frac{f_k}{S}$  - współczynnik koordynacji sygnalizacji [-],
- $\frac{S}{P}$  - strata czasu wynikająca z ilości sekund na pojazd.

Średnia wartość maksymalnych długości kolejek  $K_m$ , wyrażona liczbą pojazdów zgromadzonych na pasach danej grupy obliczeniowej w poszczególnych cyklach, rejestrowana określony czas po rozpoczęciu sygnału zielonego, wynosi:

$$K_m = \frac{q \cdot T \cdot (1 - \lambda)}{1 - \lambda \cdot X} + K_p \quad [P] \quad (9)$$

gdzie:

- $q$  - natężenie potoku dopływającego na wszystkich  $n$  pasach danej grupy obliczeniowej [P/s],
- $T \cdot (1 - \lambda)$  - efektywny sygnał czerwony [s],
- $K_p$  - średnia kolejka pozostająca [P],
- $\lambda$  - udział sygnału czerwonego w cyklu [-],
- $X$  - stopień obciążenia analizowanej obliczeniowej grupy pasów [-],
- $P$  - liczba pojazdów.

W analizie warunków ruchu na skrzyżowaniu wykorzystywana jest liczba zatrzymań jako wartość średnia przypadająca na pojazd lub łączna wszystkich pojazdów z uwzględnieniem wielokrotnych zatrzymań pojazdów. Podczas rozważań wyznacza się także udział pojazdów zatrzymanych w ogólnej liczbie pojazdów przejeżdżających przez skrzyżowanie. Średnią liczbę zatrzymań na pojazd  $z_{gr}$  wyznacza się dla danej obliczeniowej grupy pasów z następującego wzoru:

$$z_{gr} = 0,9 \cdot \left( \frac{1 - \lambda}{1 - \lambda \cdot X_{gr}} + \frac{K_{p,gr}}{q_{gr} \cdot T} \right) \quad [z/P] \quad (10)$$

gdzie:

- $q_{gr} \cdot T$  - średnia liczba pojazdów przybywających w cyklu sygnalizacji na pasach analizowanej grupy [P],
- $K_{p,gr}$  - średnia kolejka pozostająca [P],
- $\lambda$  - udział sygnału czerwonego w cyklu [-],
- $X_{gr}$  - stopień obciążenia analizowanej obliczeniowej grupy pasów [-].

## 6. KLASYFIKACJA WARUNKÓW RUCHU

Ocena opisowa warunków ruchu opiera się na koncepcji poziomów swobody ruchu (*PSR*). Poziom swobody ruchu definiuje się jako miarę warunków ruchu, uwzględniającą odczucia i oceny kierowców. Cały zakres zmienności warunków ruchu podzielony został na cztery kategorie przedstawione w tabeli 1.

*Tabela 1 – Klasyfikacja poziomów swobody ruchu*

PSR	Warunki ruchu	Średnia strata czasu $d$ [s/P]
I	bardzo dobre	$\leq 20,0$
II	dobrze	$20,1 \div 45,0$
III	przeciętne	$45,1 \div 80,0$
IV	niekorzystne	$> 80,0$

W ilościowym opisie zastosowano graniczne wartości średnich strat czasu dla poszczególnych poziomów swobody ruchu. Znajomość poziomu swobody ruchu na wlotach skrzyżowania jest niezbędna w celu weryfikacji spełnienia wymagań określonych w wytycznych projektowania przez istniejące lub projektowane skrzyżowanie. Poprawa warunków ruchu może następować poprzez zmiany geometrii skrzyżowania lub program sygnalizacji albo z równoczesnym wykorzystaniem obydwu tych sposobów.

## 7. WNIOSKI

Przedstawione w artykule czynniki, mające decydujący wpływ na przepustowość drogowych sygnalizacji świetlnych, dają możliwość obserwacji poszczególnych parametrów i ich wpływu na warunki ruchu. Zebrane zależności opisują podstawowe kryteria rządzące prawami warunków ruchu na skrzyżowaniach wyposażonych w drogową sygnalizację świetlną. Obecnie stosowane na całym świecie metodologie obliczania przepustowości prowadzą do podobnych wyników końcowych. Metoda polska, zawierająca dużo szczegółowych czynników mających wpływ na przepustowość (lokalizacja przystanków w obrębie skrzyżowań, wpływ ruchu pieszego, współczynnik koordynacji), prowadzi do bardzo miarodajnych wyników, które pokazują sprawność analizowanego skrzyżowania. Najczęściej wykorzystuje się ją w celu sprawdzenia przepustowości zaprojektowanego skrzyżowania, co nie zwalnia projektantów z przeprowadzenia modelowania mikro – symulacyjnego za pomocą programów komputerowych typu VISSM.

### **Capacity as the decisive parameter in traffic conditions of the traffic lights intersections**

#### **SUMMARY**

The present feeling in the road traffic aims to maximization of the utilization surface area as the factor having the decisive influence on traffic conditions on municipal ways. Conditions of high congestion of insufficient capacity zones exceeds the efficiency of crossings determining „bottle-necks”, being effective to stop close to crossing. In such cases traffic analyses in urban areas, being with the duty of management ways subjects,



determine load of the network. Present recommendations made by the General Management of National Ways and Highways in the methodics matter of the capacity calculation, bring in a large number of parameters to analysis of traffic conditions on crossings with traffic lights. The paper presents effectivity of the traffic measures which are significantly influence to the capacity of crossings.

## LITERATURA

- [1] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: Inżynieria ruchu drogowego, teoria i praktyka. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2008.
- [2] Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad: Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną – instrukcja obliczania. Wydawnictwo PiT, Warszawa 2004.
- [3] Rozporządzenie Ministra infrastruktury z dnia 3 lipca 2003r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (Dz. U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23 grudnia 2003r. z późn. zm.).