

# Modelowanie oporu skrzyżowań w modelach makroskopowych<sup>1</sup>

## RAFAŁ KUCHARSKI

dr inż., Politechnika Krakowska,  
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
tel.: +48 12 628 2326,  
e-mail: rkucharski@pk.edu.pl

## ARKADIUSZ DRABICKI

mgr inż., Politechnika Krakowska,  
ul. Warszawska 24, 31-155  
Kraków, tel.: +48 12 628 2326,  
e-mail: adrabicki@pk.edu.pl

## ANDRZEJ SZARATA

dr hab. inż. prof. PK, Politechnika  
Krakowska, ul. Warszawska 24,  
31-155 Kraków, tel.: +48 12 628  
2326, e-mail: aszarata@pk.edu.pl

**Streszczenie.** Artykuł prezentuje metodę obliczania oporu relacji skrzyżowań na skrzyżowaniach dla makroskopowych miejskich modeli ruchu. Pokazano, jak na podstawie dostępnej bazy danych o warszawskiej sieci drogowej można zbudować model sieciowy wraz z określeniem przepustowości i czasów traconych na relacjach skrzyżowanych. Wykorzystano w nim podstawowe formuły inżynierii ruchu (Gaca i in., 2008) pozwalające obliczyć przepustowość (poprzez oszacowanie natężenia nasycenia, udziału efektywnego sygnału zielonego, potoku nadrzędnego) oraz czasy przejazdu (swobodny oraz tracony) dla skrzyżowań sygnalizowanych, niesygnalizowanych i rond. Proponowana metoda jest uogólnieniem dostosowanym do dostępnej bazy danych i potrzeb makroskopowego modelu ruchu dużego obszaru (np. Aglomeracja Warszawska). Nie uwzględnia wszystkich czynników wpływających na przepustowość, jednak pozwala zbudować model sieciowy, w którym, tak jak w rzeczywistości, o czasie przejazdu i powstawaniu kolejek decyduje ograniczona przepustowość skrzyżowań, a nie odcinków. Metoda może być zastosowana w budowie modelu sieciowego dla dużego miasta przy użyciu dostępnej bazy danych bez znacznego zwiększenia czasów obliczeń. Wyniki metody ilustrują przykłady dla wybranych skrzyżowań w Warszawie.

**Słowa kluczowe:** model sieci drogowej, funkcja oporu, metoda obliczania przepustowości, makroskopowy model podróży

## Wprowadzenie

W miejskich sieciach drogowych przyczyną zatłoczenia i strat czasu niemal zawsze jest wyczerpana przepustowość na skrzyżowaniach, a nie na odcinkach drogowych (Gieroliminis i Daganzo, 2008); utrudnienia wynikają więc z ograniczonej przepustowości skrzyżowań i zależą od ich geometrii, planów sygnalizacji, organizacji ruchu. Stoi to w sprzeczności z praktyką modelowania ruchu w obszarach miejskich, gdzie model sieci drogowej jest parametryzowany głównie przez przepustowość odcinków i parametry ich funkcji oporu (spadek prędkości wraz ze wzrostem potoku) (Hu i in., 2008).

W artykule przedstawiono metodę modelowania sieci drogowej tak, by uwzględniała ograniczenia przepustowości na skrzyżowaniach. Zaproponowany model powstał w trakcie prac nad Warszawskim Badaniem Ruchu (WBR, 2015) i został zbudowany na podstawie bazy danych wejściowych dostępnej przy budowie modelu. Celem przedstawianej metody jest jak najwierniejsze oszacowanie strat

czasu związanych z przejazdem przez relacje skrzyżowane. Z konieczności zaproponowane metody są uproszczone i nie uwzględniają szeregu czynników wpływających na przepustowość, oraz na czas przejazdu. Proponowane metody zostały dobrane do bazy danych dostępnej w trakcie budowy modelu sieciowego (typ sygnalizacji, klasa i liczba wlotów, oznakowanie) przy jednoczesnym braku innych istotnych danych (o geometrii, planach sygnalizacji, liczbie pasów, czasach międzyzielonych, liczbie faz itp.) koniecznych do dokładnego odwzorowania. Zaproponowana metodyka bazuje na Metodach Obliczania Przepustowości (MOP). Wykorzystano metody i wzory zebrane w (Gaca i in. 2008) i użyto ich w budowie makroskopowego modelu sieciowego.

Kluczowym zadaniem było określenie, jaki jest czas przejazdu i przepustowość relacji skrzyżowanych. Czas przejazdu dla skrzyżowań niesygnalizowanych zależy głównie od rodzaju relacji (prawo, lewo, na wprost), hierarchii wykonywania manewrów (z pierwszeństwem, podporządkowana) i potoków nadrzędnych. Dla skrzyżowań sygnalizowanych czas zależy, z kolei, od planu sygnalizacji i wynikającego z niego czasu efektywnego zielonego. Na całkowity czas przejazdu składa się czas swobodny (czas przejazdu przez skrzyżowanie przy założeniu braku innych zakłóceń) oraz czas tracony – opóźnienie wynikające z zatłoczenia (czas pomiędzy dotarciem do końca kolejki a opuszczeniem skrzyżowania). Czas tracony zależy od potoku relacji i jej przepustowości. Dla relacji podporządkowanych niesygnalizowanych – zależy od potoku nadrzędnego, a dla sygnalizowanych – od przyjętego planu sygnalizacji. W artykule założono, że rzeczywiste plany sygnalizacji obliczane są przy użyciu pewnego rodzaju formuły Webstera (1958), a więc proporcjonalnie do potoku relacji i jego wagi w całym skrzyżowaniu (można, upraszczając, przyjąć, że zarówno sygnalizacje stałoczasowe, akomodacyjne, jak i działające w ramach ITS, działają w oparciu o pewne rozwinięcia formuły Webstera).

W artykule kolejno przedstawiono oznaczenia użyte w referacie, zaprezentowano bazę danych wejściowych, a następnie wprowadzono formuły na: czas swobodny, przepustowość oraz czas tracony. Następnie prezentowane są tabele podsumowujące proponowane formuły oraz sposób zastosowania metod w budowie modelu podróży. Artykuł kończą przykłady skrzyżowań z wynikami obliczeń, oraz podsumowanie.

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: R. Kucharski 70%, A. Drabicki 20%, A. Szarata 10%.

## Oznaczenia

W artykule użyto następujących oznaczeń zmiennych:

$C$	przepustowość	[poj./lb]
$t_0$	średni czas przejazdu nieobciążonej relacji	[s]
$t_{Cur}$	średni czas przejazdu obciążonej relacji	[s]
$T$	długość cyklu	[s]
$g_e$	udział efektywnego zielonego relacji	[-]
$Q$	potok relacji	[poj./lb]
$t_g$	graniczny odstęp czasu	[s]
$t_s$	czas tracony w cyklu	[s]
$t_f$	odstęp czasu pomiędzy pojazdami wjeżdżającymi z kolejki	[s]
$S$	natężenie nasycenia relacji na skrzyżowaniu sygnalizowanym	[poj./lb]
$U_c$	udział pojazdów ciężkich w potoku	[%]
$n$	liczba pasów w relacji	[-]
$R$	promień skrętu w metrach	[m]

## Dane wejściowe

Przy budowie modelu sieciowego autorzy mieli dostęp do pełnej sieci drogowej Warszawy, wraz z podstawową klasyfikacją, oraz do bazy danych eDIOM (z pełną inwentaryzacją sieci drogowej, np. oznakowanie poziome, sygnalizatory, tarcze skrzyżowań). Przy tak dokładnej sieci drogowej węzły grafu agregowano w obrębie skrzyżowań, traktując je dalej jako jeden obiekt (skrzyżowanie). Dzięki temu możliwe było określenie typu każdego skrzyżowania oraz typu relacji skrętnej w obrębie skrzyżowania. Typy skrzyżowań przedstawiono w tabeli 1, a typy relacji skrętnych w tabeli 2.

Tabela 1

Klasyfikacja modelowanych skrzyżowań	
numer	rodzaj
0	niesklasyfikowany
1	węzły
9	zawracanie na drogach ślepych
10	ronda niesygnalizowane
20	skrzyżowania trójwlotowe niesygnalizowane
21	skrzyżowania czterowlotowe niesygnalizowane
30	ronda sygnalizowane
40	skrzyżowania trójwlotowe sygnalizowane
41	skrzyżowania czterowlotowe sygnalizowane
42	węzły sygnalizowane
50	sygnalizowane przejścia dla pieszych

Tabela 2

Klasyfikacja modelowanych relacji skrętnych	
numer	rodzaj
0	niesklasyfikowana
1	prawo niesygnalizowane
2	na wprost niesygnalizowane
3	lewo niesygnalizowane
4	zawracanie niesygnalizowane
5	prawo sygnalizowane
6	na wprost sygnalizowane
7	lewo sygnalizowane
8	zawracanie sygnalizowana

Prezentowana metoda wymaga określenia dla typów odcinków dodatkowo:

- liczby pasów w przekroju odcinka i na wlocie (na wlocie skrzyżowania na końcu odcinka) – odczytanych z warstwy znaków poziomych eDIOM,
- zakazów i nakazów skrętu na końcu odcinka – odczytanych z warstwy znaków pionowych eDIOM,
- średniego oczekiwanego wykorzystania przepustowości oraz udziału pojazdów ciężkich (metoda ekspercka – używane tylko w pierwszej iteracji algorytmu),
- wagi odcinka przy projektowaniu programu sygnalizacji świetlnej (metoda ekspercka – używane tylko w pierwszej iteracji algorytmu).

Taka parametryzacja pozwala opisać relacje w obrębie węzłów i klasyfikować je pod względem:

- typu skrzyżowania (tab. 1),
- typu relacji (tab. 2),
- liczby wlotów skrzyżowania (3 lub 4),
- liczby pasów relacji (odczytana bezpośrednio lub szacowana na podstawie liczby pasów na wlocie, na wlocie oraz na linii zatrzymania),
- hierarchii relacji – za programem PTV Visum stosowana jest tu następująca notacja: pierwszeństwo relacji z i do (+ nadrzędna; – podrzędna; ? dowolna), np. `+` z podrzędnej w nadrzędnej, `++` w ciągu nadrzędnym, `-'` dowolna z podrzędnej.

W wyniku tego powstała lista kilkudziesięciu relacji skrętnych. Dla każdego typu relacji skrętnej określono jej czas przejazdu w ruchu swobodnym, przepustowość, funkcję oporu i jej parametry.

## Czas przejazdu w ruchu swobodnym ( $t_0$ )

Czas przejazdu w ruchu swobodnym  $t_0$  określony jest jako średni dodatkowy czas związany z wykonywaniem manewru skrętu przy założeniu braku wpływu innych pojazdów. Dla skrzyżowań sygnalizowanych  $t_0$  uwzględnia dodatkowo średnie straty czasu wynikające z zatrzymań na świetle czerwonym. Czasy przejazdu w ruchu swobodnym dla relacji skrzyżowań niesygnalizowanych przyjęto metodą ekspercką w oparciu o wyniki badań (Chodur i Ostrowski, 2012; Gondek, 2007) i podano w tab. 3.

Tabela 3

Czasy przejazdu w ruchu swobodnym dla podstawowych relacji skrętnych						
$t_0$ [s]	hierarchia:	◀	▲	▶	▼	
		niesygnalizowane	rondo	wszystkie	6	2
niesygnalizowane	4 wloty	z pierwszeństwem	4	0	3	-
		podporządkowana	6	4	3	-
	3 wloty	z pierwszeństwem	4	0	3	-
		podporządkowana	6	[-]	3	-
sygnalizowane	wszystkie	wszystkie	6	4	2	10

Natomiast, czasy przejazdu w ruchu swobodnym dla relacji skrzyżowań niesygnalizowanych liczone są na podstawie wzoru (1), przy oszacowaniu następujących niewiadomych:

- $T$  – cykl sterowania (założono tu, że w godzinach szczytu wszystkie sygnalizacje są przeciężone i pracują w stałym cyklu 120 s);
- $g_e$  – czas efektywnego zielonego określany w przyjętej metodzie proporcjonalnie do potoków i natężeń nasycenia. W praktyce jest wynikiem przyjętego programu sterowania, również adaptacyjnego czy działającego w ramach systemu ITS. Zaproponowano uproszczone wzory (2) dla relacji na wprost i w prawo i (3) dla relacji w lewo;
- $G_e$  – suma czasów międzyzielonych w cyklu, uproszczona dla całej sieci metodą ekspercką na 10 s;
- $Q$  – potoki w relacjach na skrzyżowaniu (we wzorze 2) używane jako wagi w formule Webstera;
- $f_k$  – współczynnik koordynacji.

Udział efektywnego zielonego jest zmienny w ciągu doby i na większości skrzyżowań adaptuje się do warunków ruchowych, wobec tego nawet mając dostęp do pełnych danych o planach sygnalizacji, musiałyby być one uśrednione w statycznym modelu makroskopowym. Dlatego proponuje się następującą heurystykę będącą uproszczeniem formuły Webstera w oparciu o sumę potoków na skrzyżowaniu, potok relacji oraz typ relacji skrętnej: wzór (2) dla relacji na wprost i w prawo oraz wzór (3) dla relacji w lewo. We wzorze (1) uwzględniono wpływ koordynacji (jeśli występuje) na podstawie tabeli 6–7 z [3] przy dodatkowym rozróżnieniu na skrzyżowania objęte ZSZR, wzór (4).

$$t_0 = \frac{T}{2} \cdot \frac{(1 - g_e)^2}{1 - \frac{Q}{Cap} \cdot g_e} \cdot f_k \quad (1)$$

$$g_e = \frac{Q}{0.5 \cdot \sum_{j \in N} Q_j} \cdot \frac{120 - G_e}{120} \quad (2)$$

$$g_e = \frac{Q}{\sum_{j \in N} Q_j} \cdot \frac{120 - G_e}{120} \quad (3)$$

$$f_k = \begin{cases} 1 & \text{nieskoordynowane oraz w lewo} \\ 0.2 / G_e & \text{skoordynowane na wprost i w prawo} \\ 0.245 / G_e - 0.4 & \text{skoordynowane w ZSZR na wprost i w prawo} \end{cases} \quad (4)$$

### Przepustowość

Przepustowość relacji dla skrzyżowań niesygnalizowanych:

- nie jest dodatkowo ograniczana na relacjach nadrzędnych skrzyżowań niesygnalizowanych;
- dla skrętu w lewo z relacji nadrzędnej jest dana wzorem (5), gdzie  $t_f$  i  $t_g$  przyjęto na podstawie (Gaca i in., 2008);

- dla wjazdów z drogi podporządkowanej dana jest wzorem (6).

$$C_{lewo} = \frac{3600}{t_f} e^{-1.1 \cdot Q_n \cdot (t_g - t_f / 2)} \quad (5)$$

$$C_{podporz} = \frac{3600}{t_f} e^{-1.07 \cdot Q_n \cdot (t_g - t_f / 2)} \quad (6)$$

Przepustowość rond niesygnalizowanych dana jest wzorem (7), gdzie relacja  $Q_{mwl}$  nadrzędna przybliżona jest sumą potoków na wszystkich wlotach pomniejszoną o potok z danego wlotu.

$$C_{rondo} = \left( Q_{mwl} \exp\left(-0.95 \cdot \frac{Q_n t_g}{3600}\right) \right) / \left( 1 - \exp\left(-1.1 \cdot \frac{Q_n t_f}{3600}\right) \right) \quad (7)$$

Przepustowość skrzyżowań sygnalizowanych dana jest wzorem (8) wykorzystującym:

- udziału efektywnego sygnału zielonego (1)
- natężenie nasycenia  $S$  dla relacji na wprost obliczone wzorem (9) przy założeniu typowych szerokości pasów, zerowego nachylenia, i standardowy dla danego typu odcinka udział pojazdów ciężkich  $U_c$
- dla relacji skrętnej obliczone jest wzorem (10) przy założeniu promienia skrętu w prawo 10 m, w lewo 35 m.

$$C_{sygn} = S \cdot g_e \quad (8)$$

$$S_w = n \cdot (1800) / (1 + U_c) \quad (9)$$

$$S_r = n \cdot (1800) \cdot \left( \frac{(R/1000 + 1.025)}{(1 + 2/R)} \right) \cdot \frac{1}{1 + U_c} \quad (10)$$

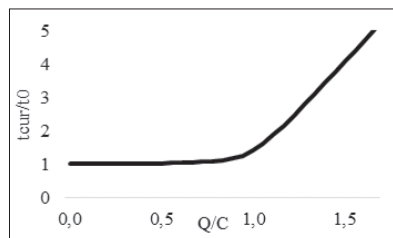
### Czas tracony (opóźnienie)

Czas przejazdu przez relację skrętą na skrzyżowaniu zależy od czasu swobodnego, przepustowości oraz funkcji oporu. Funkcja oporu pozwala oszacować czas przejazdu dla zadanego wykorzystania przepustowości. Zazwyczaj określana i obliczana jest dla odcinków, w przyjętej metodzie użyto jej dla relacji skrętnych. Wynika ona głównie z czasu obsługi kolejki i dana jest wzorami (11) dla relacji niesygnalizowanych i (12) dla sygnalizowanych. Kształt taki zaproponowany został przez Akcelik (1981). Funkcja ta ma podwójne zastosowanie: przede wszystkim jej celem jest obliczenie faktycznego średniego czasu przejazdu przez relację skrętą dla zadanego wykorzystania przepustowości (z tego powodu musi być realistyczna), dodatkowo służy ona do obliczenia funkcji celu w problemie rozkładu ruchu (z tego powodu powinna być ciągła, różniczkowalna, wklęsła, łatwo całkowalna). Proponowana w (Gaca i in., 2008) formuła Akcelik jest co prawda ciągła i różniczkowalna, ale w domyślnej parametryzacji bardzo gwałtownie rośnie po przekroczeniu przepustowości, co stanowi problem w zbieżności algorytmu rozkładu ruchu. Autorzy zastosowali więc łagodniejszą parametryzację ( $a=0.2$ ,  $b=20$ ) w formule dostępnej w programie Visum (13). Na rysun-

ku 1 pokazano kształt funkcji (4) przy przyjętej parametryzacji. Obliczanie czasu traconego ma sens tylko dla relacji skrętnych, dla których przepustowość jest ograniczona, dla pozostałych czas tracony jest zawsze zerowy.

$$t_{Cur} = t_0 + 900 \cdot \left( (Q/C - 1) + \sqrt{(Q/C - 1)^2 + 8(Q/C - 1)} \right) \quad (11)$$

$$t_{Cur} = t_0 + 900 \cdot \left( (Q/C - 1) + \sqrt{(Q/C - 1)^2 + \frac{7r_s w_s (Q/C)^2}{C}} \right) \quad (12)$$



Rys. 1.  
Funkcja oporu Akcelik  
przy parametrach a=0,2, b=20

$$t_{Cur} = t_0 + 900 \cdot a \cdot \left( (Q/C - 1) + \sqrt{(Q/C - 1)^2 + \frac{8 \cdot b \cdot Q/C}{d \cdot a}} \right) \quad (13)$$

### Algorytm

Proponowana metoda została wdrożona w makroskopowym, statycznym modelu rozkładu ruchu na sieć. W pierwszej fazie czasy przejazdu i przepustowości obliczane są na podstawie wartości typowych: typowe wykorzystanie przepustowości dla relacji niesygnalizowanych we wzorach (5) do (7), przewidywane wagi wlotów zamiast potoków w obliczeniach planu sygnalizacji we wzorach (1) do (3). Po takiej wstępnej parametryzacji sieć jest gotowa do obliczeń rozkładu ruchu z wykorzystaniem oporu na relacjach skrętnych. Na podstawie parametrów sieci potoki określone w modelu popytu obciążają ścieżki najkrótsze, aż do osiągnięcia równowagi w sensie Wardopa. Algorytm wybiera ścieżki najkrótsze na podstawie czasów przejazdu obliczonych przy użyciu formuł zaproponowanych powyżej, następnie obciąża je i aktualizuje czas na podstawie wykorzystania przepustowości przy użyciu wzoru (13). Po obliczeniu rozkładu ruchu na sieć formuły pozwalające obliczyć czasy przejazdu i przepustowości są aktualizowane z użyciem potoków obliczonych w rozkładzie ruchu (potok nadrzędny dla relacji niesygnalizowanych i efektywne zielone dla relacji sygnalizowanych). Pętla taka

powtarzana jest aż do uzyskania równowagi pomiędzy czasami obliczonymi w metodzie a wynikającymi z obciążenia sieci. W pierwotnej wersji algorytmu założono, że proces taki będzie zbieżny do punktu stałego (kontrakcja w sensie Banacha), jednak dla zagwarantowania stabilizacji procesu zastosowano metodę kolejnych uśrednień (MSA), która gwarantuje zbieżność.

Do obliczenia czasów przejazdu oraz przepustowości w proponowanej metodzie konieczne jest przybliżenie potoków nadrzędnych (dla skrzyżowań niesygnalizowanych), oraz potoków we wszystkich relacjach na węźle (do oszacowania efektywnego zielonego na skrzyżowaniach sygnalizowanych). Proponowana jest tutaj metoda iteracyjna, w której w pierwszej iteracji wartości potoków przyjmowane są arbitralnie (na podstawie przyjętych wartości typowych), a w kolejnych iteracjach wykorzystano faktyczne natężenia uzyskane w modelu. Korzystano z zapytań bazodanowych, używając relacji obiektów w bazie danych, dzięki temu możliwe było określenie potoku nadrzędnego dla większości relacji (przykładowo zapytanie do bazy danych modelu sieciowego: [FROMLINK\REVERSELINK\VOL] zwróci potok w kierunku przeciwnym – nadrzędny dla relacji w lewo z drogi podporządkowanej na skrzyżowaniu niesygnalizowanym). Niestety takie zapytania nie są możliwe dla wszystkich relacji (np. potok nadrzędny na rondzie czy potok nadrzędny w relacji podporządkowanej na wprost); wynika to z ograniczeń zapytań bazodanowych, wówczas konieczne jest stosowanie przybliżeń. W szacowaniu długości sygnału zielonego użyto faktycznych potoków w relacji i sumy potoków na skrzyżowaniu, korzystając z uproszczonej formuły Webstera.

### Tabele przepustowości, czasów przejazdu i wartości potrzebnych do ich obliczenia dla typowych relacji skrętnych.

W zbiorczych tabelach poniżej podsumowano prezentowaną metodę. W trzech kolejnych tabelach dla poszczególnych typów skrzyżowań podano proponowane w metodzie wartości zmiennych i sposoby ich obliczania. W tabeli 4 przedstawiono sposób obliczania oporu na węzłach bezkolizyjnych i skrzyżowaniach nieskasyfikowanych, w tabeli 5 dla skrzyżowań niesygnalizowanych i rond wraz z określeniem potoku nadrzędnego i przepustowości, w tabeli 6 dla skrzyżowań sygnalizowanych wraz z określeniem efektywnego zielonego oraz natężenia nasycenia.

Tabela 4

Zestawienie zmiennych i wzorów do obliczania przepustowości i czasu przejazdu na węzłach bezkolizyjnych i skrzyżowaniach nieskasyfikowanych (poza Warszawą lub na drogach niskich klas)						
lp.	typ węzła (tab.1)	opis relacji	typ relacji (tab.2)	hierarchia <sup>2</sup>	czas swobodny t <sub>0</sub> (tab. 3)	przepustowość C [zapytanie bazodanowe]
1	01 – węzły bezkolizyjne	włączenie podporządkowane	?	-+	0s	przepustowość pasa włączenia [TOLINK\CAPPRT] / [TOLINK\NUMLANES]
2		relacja w ciągu nadrzędnym na węźle	?	++		nieograniczone
3		na wprost na węźle	2 ▲	??		nieograniczone
11	00 – nieskasyfikowane (poza Warszawą lub nieistotne w Warszawie)	skręt w prawo z drogi z pierwszeństwem przejazdu	1 ►	+?	2s	nieograniczone
12		na wprost z drogi z pierwszeństwem przejazdu	2 ▲	+?	0s	
13		skręt w lewo z drogi z pierwszeństwem przejazdu	3 ◀	+?	6s	
14		nawracanie na skrzyżowaniu	4 ▼	??	-	zablokowane
15	09 – nawracanie	nawracanie na drodze ślepej	?	??	15s	60

Zestawienie zmiennych i wzorów do obliczania przepustowości i czasu przejazdu na rondach i skrzyżowaniach niesygnalizowanych trójwlotowych i czterowlotowych								
lp.	typ węzła (tab.1)	opis relacji	typ relacji (tab.2)	hierarchia <sup>2</sup>	czas swobodny t <sub>0</sub> (tab. 3)	przepustowość C [wzór, lub zapytanie bazodanowe]	potok nadrzędny relacji Q <sub>n</sub> [zapytanie bazodanowe]	funkcja oporu (wzór)
101	10 – ronda niesygnalizowane	w prawo na rondzie niesygnalizowanym	1 ►	??	2s	$Q_n \exp\left(-0,95 \cdot \frac{Q_j t_e}{3600}\right)$ $1 - \exp\left(-1,1 \cdot \frac{Q_j t_e}{3600}\right)$	całkowity potok na rondzie minus potok wlotu (przybliżenie) [VIANODE] VOL]-[VOL]	(13)
102		na wprost na rondzie niesygnalizowanym	2 ▲	??	4s			(13)
103		w lewo na rondzie niesygnalizowanym	3 ◀	??	6s			(13)
104		zawracanie na rondzie niesygnalizowanym	4 ▼	??	10s			(13)
204	20 i 21 – trójwlotowe i czterowlotowe niesygnalizowane	nawrotka niesygnalizowana	4 ▼	??	–	zablokowane	–	brak
211		skręt w prawo z drogi z pierwszeństwem przejazdu	1 ►	+?	3s	przepustowość wylotu [TOLINK\CAPPRT]	–	(13)
212		na wprost z drogi z pierwszeństwem przejazdu	2 ▲	+?	0s	przepustowość wylotu [TOLINK\CAPPRT]	–	(13)
213		skręt w lewo z drogi z pierwszeństwem przejazdu	3 ◀	+?	4s	$3600 / 2,5 \cdot e^{-1,10 \cdot Q_n \cdot (5,7-2,5 \cdot 2)}$	potok w kierunku przeciwnym wlotu (przybliżenie) [FROMLINK\ REVERSELINK] VOL]	(13)
221		skręt w prawo z wlotu podporządkowanego niesygnalizowanego	1 ►	-?	3s	$3600 / 2,5 \cdot e^{-1,07 \cdot Q_n \cdot (5,4-3,1 \cdot 2)}$	potok na wylocie (na pas) ([TOLINK\VOL]- VOL]) / [TOLINK\ NUMLANES]	(13)
222		na wprost z wlotu podporządkowanego niesygnalizowanego	2 ▲	-?	4s	$3600 / 2,5 \cdot e^{-1,07 \cdot Q_n \cdot (5,5-3,3 \cdot 2)}$	dwukrotność najbardziej obciążonego wlotu (przybliżenie) 2*[FROMLINK\MAX: OUTMAINTURNS] TOLINK\VOL]	(13)
223		skręt w lewo z wlotu podporządkowanego niesygnalizowanego	3 ◀	-?	6s	$3600 / 2,5 \cdot e^{-1,07 \cdot Q_n \cdot (5,6-3,2 \cdot 2)}$	potok na wylocie minus potok relacji [TOLINK\VOL]-[VOL]	(13)

Tabela 6

Zestawienie zmiennych i wzorów do obliczania przepustowości i czasu przejazdu na skrzyżowaniach sygnalizowanych trójwlotowych i czterowlotowych oraz skrzyżowaniach z wyspą centralną							
id.	typ relacji	typ węzła	długość efektywnego sygnału zielonego g <sub>e</sub> – jeśli nie podano ręcznie. (przybliżone heurystyki na podstawie formuły Webstera)	czas przejazdu t <sub>0</sub>		heurystyka liczby pasów n (jeśli nie podano ręcznie)	natężenie nasycenia S (do wzoru (8))
				swobodny	związany z sygnalizacją		
1105	5 ►	40 i 41 sygnalizowane trój- i czterowlotowe	$\frac{Q}{0,5 \cdot \sum_{j \in N} Q_j} \cdot \frac{120 - G_e}{120}$	2s	$\frac{T}{2} \cdot \frac{(1 - g_e)^2}{1 - \frac{Q}{Cap} \cdot g_e} \cdot f_k$	1	$n \cdot 1800 / (1 + U_c) \cdot \frac{10^{-3} R + 1,025}{1 + 2 / R}$
1106	6 ▲			4s		poniżej 4 pasów na wlocie: min z pasów na wlocie i wylocie MIN([FROMLINK\ NUMLANES], [TOLINK\ NUMLANES]) 4 i więcej pasów na wlocie: liczba pasów minus 2 [FROMLINK\ SO_LICZBA_PASOW_NA_KONCU_ODCINKA]-2	$n \cdot 1800 / (1 + U_c)$
1107	7 ◀			6s		poniżej 4 pasów: min z pasów na wlocie i wylocie minus 2 MAX(1, MIN([FROMLINK\ NUMLANES], [TOLINK\ NUMLANES])-2) 4 i więcej pasów: dwa pasy MIN(2, MIN([FROMLINK\ NUMLANES], [TOLINK\ NUMLANES]))	$n \cdot 1800 / (1 + U_c) \cdot \frac{10^{-3} R + 1,025}{1 + 2 / R}$
1108	8 ▼			10s		$\frac{Q}{2 \cdot \sum_{j \in N} Q_j} \cdot \frac{120 - G_e}{120}$	1

## Przykłady skrzyżowań

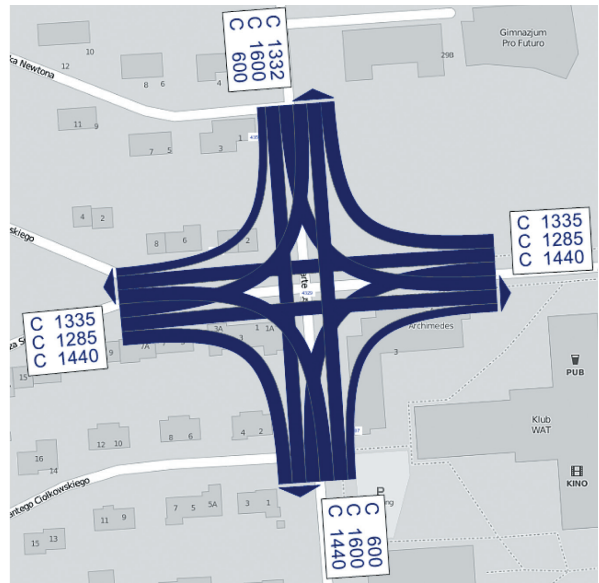
W przykładach zamieszczonych poniżej zaprezentowano wyniki zastosowanej metody dla kilku wybranych skrzyżowań: niesygnalizowanego (dla którego pokazano obliczone przepustowości  $C$ ) oraz sygnalizowanego (dla którego pokazano obliczone czasy przejazdu  $t_0$ , efektywne zielone  $e_g$  i przepustowości  $C$ ).

## Podsumowanie

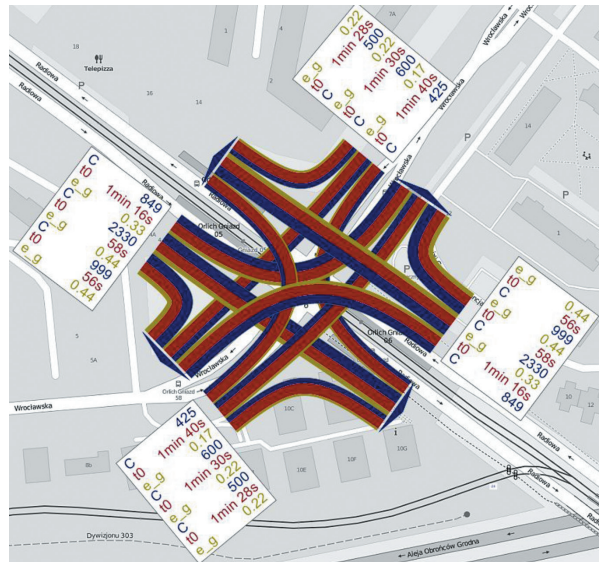
Bogata baza danych dostępna w Warszawie pozwoliła na szczegółowy opis sieci drogowej. Podjęto próbę zastosowania formuł do obliczenia przepustowości i czasu przejazdu na relacjach skrętnych skrzyżowań. Wymagało to pewnych arbitralnych założeń i uproszczeń, jednak w efekcie otrzymano realistyczny model sieci drogowej. Zaproponowane rozwiązanie wdrożono w rozsądnym czasie, w przeciwieństwie do metody dokładnej, w której konieczne jest odwzorowanie geometrii skrzyżowań oraz planów sygnalizacji (które w większości są adaptacyjne, więc nie da się ich zamodelować statycznie). Przy zaproponowanej parametryzacji udało się odwzorować faktyczne wąskie gardła w sieci i oszacować ich przepustowość. Dzięki temu wyniki obciążenia sieci są oparte na realistycznych założeniach: podróżni wybierają trasy najkrótsze, a czas przejazdu zależy głównie od czasu przejazdu przez skrzyżowania. Zaproponowana metoda wymaga dodatkowych testów i analiz. W kolejnych etapach prac należy z jednej strony zwiększać dokładność, by uwzględnić istotne elementy wpływające na czas przejazdu przez skrzyżowania w miastach, z drugiej weryfikować uzyskane wyniki z rzeczywistymi czasami przejazdu oraz oceniać przydatność i zasadność takiego rozbudowania modelu sieciowego.

## Literatura

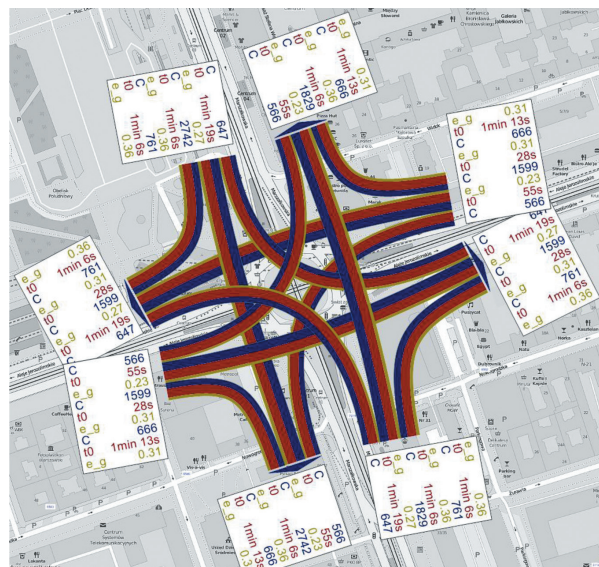
1. Akcelik R., *Traffic signals: capacity and timing analysis*, 1981.
2. Chodur J., Ostrowski K., *Charakterystyka strumienia ruchu w początkowym okresie sygnału zielonego na skrzyżowaniu z sygnalizacją*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2012, nr 5.
3. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego: teoria i praktyka*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2008.
4. Geroliminis N., Daganzo C.F., *Existence of urban-scale macroscopic fundamental diagrams: Some experimental findings*, Transportation Research Part B: Methodological, 42(9), 2008.
5. Gondek S., *Problem czasów międzyzielonych na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną*, „Logistyka”, 2007.
6. Hu M.B., Jiang R., Wu Y.H., Wang W.X., Wu Q.S., *Urban traffic from the perspective of dual graph*, The European Physical Journal B, 63(1), 2008.
7. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S., Kieć M., Ostrowski K., *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, GDDKiA, Warszawa 2004.
8. Tracz M., Tarko A., Chodur J., *Przepustowość skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, 1992.
9. Warszawskie Badanie Ruchu PBS, Politechnika Krakowska, Politechnika Warszawska, 2015.
10. Webster F. V., *Traffic signal settings*, No. 39, 1958.



Rys. 1. Przykład wyników na skrzyżowaniu niesygnalizowanym – przepustowości  
Źródło: opracowanie własne



Rys. 2. Przykład wyników na skrzyżowaniu sygnalizowanym I  
Źródło: opracowanie własne



Rys. 3. Przykład wyników na skrzyżowaniu sygnalizowanym II  
Źródło: opracowanie własne