

Rozkład ruchu w grupie pasów na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją¹

JANUSZ CHODUR

prof. PK dr hab. inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel.: +48 12 628 23 55, e-mail: jchodur@pk.edu.pl

Streszczenie. Istotną rolę w analizie sprawności skrzyżowań z sygnalizacją świetlną odgrywa znajomość natężeń ruchu poszczególnych relacji na każdym z pasów. Często brak jest takich danych dotyczących relacji korzystających z więcej niż jednego pasa. Polska metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją zawiera procedurę rozkładu ruchu na pasy z kryterium równych stopni nasycenia na poszczególnych pasach obliczeniowej grupy pasów, co w założeniu ma odpowiadać sytuacji wyboru przez dojeżdżającego do skrzyżowania kierowcę pasa, na którym występują lepsze warunki ruchu. Podjęte badania na kilkunastu wlotach skrzyżowań miejskich i kilkudziesięciu wlotach skrzyżowań zamiejskich pozwoliły na ocenę dokładności obliczeniowego szacowania natężeń na pasach grupy. Wyniki tych badań pokazują rzeczywiste rozkłady ruchu na pasy oraz różnice natężeń pomierzonych i obliczonych. W większości przypadków różnice te nie przekraczają 10%, ale występują też sytuacje, w których dochodzą do 20%, a w specyficznych przypadkach i więcej procent. Różnice takie nie dyskwalifikują metody obliczeniowej, lecz świadczą o istnieniu innych, poza warunkami ruchu na pasach – ocenianymi najczęściej na podstawie długości kolejek i organizacji ruchu na pasach – czynników wpływających na wybór pasa. Potencjalne czynniki determinujące omawiane są w artykule. Szczegółowo przeanalizowano udział pojazdów ciężkich na poszczególnych pasach i jego wpływ na obliczeniowo wyznaczone natężenia ruchu. Wykazano, że stosowanie w procedurze obliczeniowej struktury rodzajowej określonej dla każdego pasa, a nie dla grupy pasów – poprawia znacząco dokładność szacowania natężeń. Podano orientacyjne zależności pozwalające szacować udział pojazdów ciężkich na pasach obliczeniowej grupy.

Słowa kluczowe: skrzyżowanie z sygnalizacją, obliczeniowa grupa pasów, rozkład ruchu na pasy, kryterium równych stopni nasycenia

Wprowadzenie

Wloty skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, zwłaszcza w dużych miastach, mają często po kilka pasów ruchu, w tym więcej niż jeden pas przeznaczony dla danej relacji. Ma to miejsce, gdy krzyżują się drogi wielopasowe i relacja na wprost prowadzona jest na dwóch lub trzech pasach ruchu, albo relacja skrętna o dużym natężeniu ma do dyspozycji więcej niż jeden pas. W wyniku pomiarów natężenia ruchu dysponuje się zazwyczaj strukturą kierunkową ruchu na wlocie, jednakże bez rozbicia natężenia danej relacji na poszczególne pasy ruchu. W obliczeniach przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją [1] wymagana jest znajomość natężenia poszczególnych relacji na każdym z pasów ruchu. Brak takich danych z pomiarów powoduje konieczność obliczenia natężeń ruchu na poszczególnych pasach. Określenie udziału poszczególnych relacji na pasie wspólnym, w przypadku gdy relacje te korzystają wy-

łącznie z tego pasa, następuje wprost z dostępnych danych o natężeniach relacji. Jeżeli jednak relacja występująca na danym pasie korzysta również z innego (jednego lub więcej) pasa, to jej natężenie należy podzielić na poszczególne pasy stosownie do rzeczywistych zachowań uczestników ruchu.

O wyborze pasa ruchu przez kierowcę, w sytuacji gdy ma on możliwość przejazdu przez skrzyżowanie w zamierzonym kierunku z więcej niż jednego pasa, mogą decydować różne czynniki: organizacja ruchu na pasie (częściej wybierany jest pas samodzielnie prowadzący daną relację, a rzadziej pas z którego korzysta również relacja o kolizyjnym przebiegu), obciążenie pasów ruchem (częściej wybierany jest pas mniej obciążony, o krótszej kolejce), rodzaj pojazdu (pojazdy ciężkie częściej poruszają się pasem prawnym), zamierzony manewr skrętu w bliskiej odległości za skrzyżowaniem oraz znajomość warunków ruchu panujących na wlocie skrzyżowania. W metodzie obliczania przepustowości [1] większość z wymienionych czynników nie jest uwzględniana lub jest uwzględniana jedynie pośrednio w modelu obliczeniowym umożliwiającym podział natężenia ruchu na poszczególne pasy. Przesłanki te, jak również zmiany obciążenia skrzyżowań oraz zachowań uczestników ruchu, jakie zaszły w okresie (10 lat) od opublikowania polskiej metody obliczeniowej, uzasadniają podjęcie badań weryfikacyjnych. Celem artykułu jest ocena założeń i dokładności obliczeniowego szacowania natężeń na pasach grupy za pomocą procedury zawartej w polskiej metodzie obliczania przepustowości.

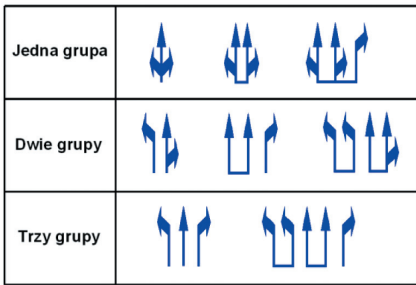
Obliczeniowa grupa pasów

Analiza przepustowości skrzyżowania z sygnalizacją świetlną prowadzona jest dla poszczególnych jego elementów – skrzyżowanie na ogół dekomponowane jest na pasy ruchu lub zespół pasów {1, 2, 3}, które są analizowane w obliczeniach przepustowości wspólnie. Podobnie jak w metodach zagranicznych [2, 3], w krajowej metodzie obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną MOP-SZS-04 [1] wprowadzono pojęcie obliczeniowej grupy pasów. Określa się ją jako zespół pasów (może to być jeden lub więcej pasów), na których pojazdy jednej, dwóch lub trzech relacji tworzą wspólne lub zależne od siebie kolejki pojazdów. Praktycznie dwa lub więcej pasów ruchu zalicza się do tej samej obliczeniowej grupy pasów, jeśli pojazdy co najmniej jednej z relacji mogą wykonać zamierzony manewr z każdego z tych pasów. Przykłady obliczeniowych grup pasów pokazano na rysunku 1.

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2014.

Model obliczeniowy rozkładu ruchu na pasy

O warunkach ruchu na pasie decyduje natężenie ruchu Q [P/h] pojazdów korzystających z tego pasa oraz reguły i parametry obsługi pojazdów z kolejki podczas sygnału zielonego. Obsługa pojazdów danej relacji na pasie ruchu, która może być bezkolizyjna lub kolizyjna z innymi pojazdami (pieszymi) mającymi pierwszeństwo przejazdu (przejęcia), reprezentowana jest w metodzie obliczania przepustowości [1] przez natężenie nasycenia S [P/hz], czyli maksymalną liczbę pojazdów, które w godzinie sygnału zielonego mogłyby przejechać linię zatrzymań pod warunkiem występowania ciągłej kolejki. Natężenie nasycenia determinowane jest parametrami geometrycznymi pasa (szerokość, promień skrzywienia, spadek i położenie pasa na wlocie), parametrami ruchu na tym pasie (udział pojazdów ciężkich, struktura kierunkowa ruchu) oraz cechami ruchu nadrzędnego w przypadku występowania w danej fazie sygnalizacyjnej kolizyjnych strumieni ruchu (natężenie strumienia priorytetowego pojazdów i/lub pieszych).



Rys. 1. Przykłady grup pasów na wlocie skrzyżowania [1]

Jeżeli na pasach zaliczonych do obliczeniowej grupy występują zróżnicowane warunki (na niektórych dłuższy czas rozładowania kolejki pojazdów, a często i dłuższe kolejki), wybór pasa przez kierujących pojazdami dojeżdżającymi do skrzyżowania prowadzi zazwyczaj do ujednolicenia warunków ruchu pomiędzy pasami tej samej grupy obliczeniowej. Można z pewnym uproszczeniem stwierdzić, że wybór pasa z uwagi na możliwość jak najszybszego zjazdu ze skrzyżowania, z możliwie najmniejszymi stratami czasu, powoduje wyrównanie stopni nasycenia pasów w obrębie obliczeniowej grupy pasów. To wyrównanie stopni nasycenia Y przyjęto w polskiej metodzie obliczeniowej [1] jako zasadę rozkładu ruchu na pasy. Zakłada się, że ruch pojazdów na każdym pasie obliczeniowej grupy sterowany jest przez jedną grupę sygnalizacyjną. Stopień nasycenia pasa ruchu w grupie oblicza się według wzoru:

$$Y = \frac{1}{n_{gr}} \cdot \left(\sum_j \frac{Q_{Lj}}{S_{Lj}} + \sum_j \frac{Q_{Wj}}{S_{Wj}} + \sum_j \frac{Q_{Pj}}{S_{Pj}} \right) \quad \{-\} \quad (1)$$

gdzie:

- Q_{rj} – natężenie relacji r (L, W, P) na pasie j [P/h],
- S_{rj} – natężenie nasycenia relacji r (L, W, P) na pasie j [P/hz],
- n_{gr} – liczba pasów w grupie obliczeniowej.

Natężenie rozkładanej relacji r korzystającej z wydzielonego pasa w obliczeniowej grupie (rys. 2a – pasy nr 1 i 2), wyznacza się z zależności:

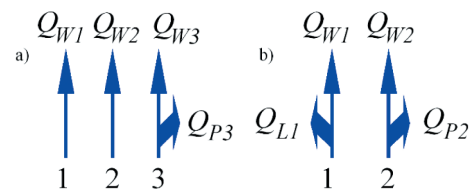
$$Q_{rj} = Y \cdot S_{rj} \quad \text{[P/h]} \quad (2)$$

natomiast natężenie tej relacji na wspólnym pasie ($j = wsp$) – rysunek 2a – pas nr 3, gdy w grupie występuje jeden pas wspólny:

$$Q_{r,wsp} = Q_r - \sum_{wy} Q_{r,wy} \quad \text{[P/h]} \quad (3)$$

gdzie:

$\sum_{wy} Q_{r,wy}$ – suma natężeń rozważanej relacji na wydzielonych pasach ($j = wy$) – rysunek 2a – pasy nr 1 i 2.



Rys. 2. Grupy pasów: a – z jednym pasem wspólnym (nr 3); b – z dwoma pasami wspólnymi (nr 1 i 2)

Gdy w obliczeniowej grupie występują dwa pasy wspólne (rys. 2b – pasy nr 1 i 2), natężenie rozkładanej relacji (w tym przypadku jest to relacja na wprost) na wspólnym pasie oblicza się ze wzoru:

$$Q_{wj} = S_{wj} \cdot \left(Y - \frac{Q_{rj}}{S_{rj}} \right) \quad \text{[P/h]} \quad (4)$$

gdzie:

- Q_{rj} , S_{rj} – natężenie ruchu [P/h] i natężenie nasycenia [P/hz] relacji skrajnej na pasie j wspólnym z relacją na wprost.

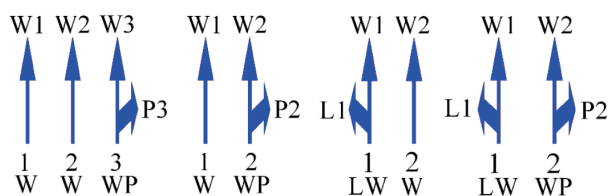
Rozwiązania poszukuje się w procedurze iteracyjnej, dopuszczając maksymalną różnicę wartości Y w dwóch kolejnych krokach wynoszącą 0,005. W procedurze tej zakłada się, że struktura rodzajowa rozkładanej relacji, będzie taka sama na każdym pasie, z którego ona korzysta. Jest to istotne uproszczenie, gdyż w rzeczywistości ruch pojazdów ciężkich często koncentruje na pasie prawym.

W metodzie kanadyjskiej [2] natężenie ruchu relacji korzystającej wspólnie z innymi relacjami z więcej niż jednego pasa ruchu rozkłada się proporcjonalnie do natężeń nasycenia pasów ruchu zaliczonych do obliczeniowej grupy. Pomimo innego niż w metodzie polskiej algorytmu obliczeniowego w obu metodach uzyskuje się niemalże identyczne wyniki (zgodność do kilku P/h). Decyduje o tym praktycznie takie samo kryterium rozkładu ruchu na pasy w obu metodach (równe stopnie nasycenia na pasach grupy).

W metodzie amerykańskiej [3] nie rozkłada się obliczeniowo natężenia ruchu na pasy, a tylko, wyznaczając natężenie nasycenia dla grupy pasów, uwzględnia się tzw. wykorzystanie pasa w grupie, co ma wyrażać zróżnicowanie natężeń na pasach grupy.

Badania empiryczne

Badania empiryczne – podjęte dla weryfikacji przyjętych założeń metodologicznych rozkładu ruchu na pasy [1], zwłaszcza w świetle rosnącego wskaźnika motoryzacji i zmian zachowań uczestników ruchu – poprzedziła faza przygotowań obejmująca m.in. wybór poligonów badawczych spełniających określone kryteria, przyjęcie techniki i czasokresu prowadzenia badań. Brano pod uwagę jedynie takie grupy, w skład których wchodzi co najmniej dwa pasy ruchu i na których występują przynajmniej dwie relacje. Tylko w takich grupach występuje istotny pod względem opisu analitycznego problem wyboru pasa ruchu przez kierowców pojazdów relacji korzystającej z więcej niż jednego pasa. Ostatecznie do badań wybrano cztery różne konfiguracje pasów tworzących obliczeniowe grupy (rys. 3): jedną złożoną z trzech pasów o organizacji ruchu W-W-WP oraz trzy konfiguracje dwupasowe o następującej organizacji ruchu: W-WP, LW-W i LW-WP. W przypadku grup trzypasowych rzadko występują inne konfiguracje, z uwagi na stosowanie w arteriach wielopasowych (2x3 pasy) na wlotach skrzyżowań dodatkowych pasów do skrętu w lewo, które stanowią odrębną grupę obliczeniową.

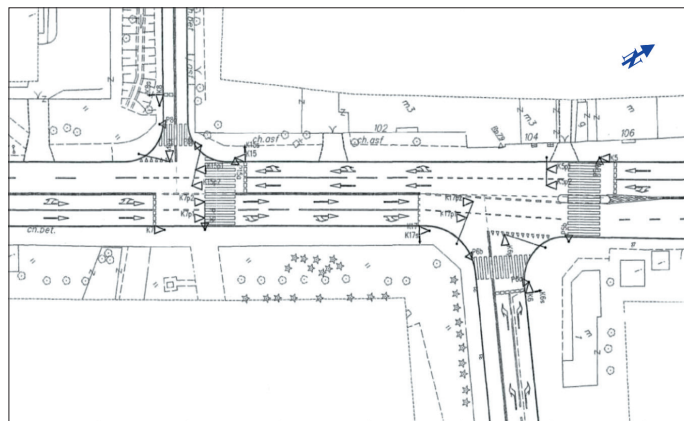


Rys. 3. Konfiguracje pasów ruchu w obliczeniowych grupach przyjęte do badań

Do badań przyjęto łącznie 13 grup pasów na 9 skrzyżowaniach w Krakowie [4], przez które przebiega zarówno ruch lokalny, jak i tranzytowy. W ten sposób możliwe było ujęcie w badaniach populacji kierowców zróżnicowanej z uwagi na znajomość skrzyżowań, bez wyróżniania jednak w dalszych analizach tego trudnego w praktycznym określeniu czynnika.

Na niektórych skrzyżowaniach występował kolizyjny przebieg ruchu relacji skrętnych z pojazdami z przeciwnego wlotu, jak również z pieszymi. Wykluczono możliwość występowania kolizji relacji skrętnych z ruchem tramwajów. Wymagana była ciągłość przekroju na wlocie i wylocie skrzyżowania, tak aby przekrój na wylocie (np. z znikającym pasem) nie wpływał na zachowania kierujących pojazdami na wlocie skrzyżowania. Dopływ ruchu do skrzyżowania i powstające na wlocie kolejki powinny umożliwiać swobodny wybór pasa ruchu (wlot nie powinien być przeciążony, kolejki z dodatkowych pasów dla relacji skrętnych nie powinny przekraczać długości tych pasów), jednak nie powinny to być zbyt małe natężenia, przy których w cy-

klach sygnalizacyjnych dojeżdżają do linii zatrzymań pasa ruchu pojedyncze pojazdy (w takim przypadku względny błąd oszacowania natężenia na pasie ruchu może przyjmować duże wartości). W jednym przypadku dwupasowych obliczeniowych grup pasów wzięto dodatkowo pod uwagę dwa blisko położone skrzyżowania trójwlotowe (schemat skrzyżowania o przesuniętych wlotach, z przesunięciem w lewo – rys. 4), co umożliwiło analizę wpływu na rozkład ruchu na pasy różnej organizacji ruchu na kolejnych liniach zatrzymań.



Rys. 4. Organizacja ruchu na wlotach skrzyżowań al. 29 Listopada z ulicami Nad Strugą i Dobrego Pasterza w Krakowie

W czasie pomiarów (wideo rejestracja oraz notowania ręczne) rejestrowano natężenia ruchu analizowanych relacji kołowych oraz relacji nadrzędnych (kołowych i pieszych) dla kolizyjnych relacji skrętnych, rodzaje pojazdów (pojazdy lekkie i ciężkie), długość sygnału zielonego oraz cyklu sygnalizacyjnego (większość sygnalizacji, ok. 80% funkcjonowała w trybie zmiennoczasowym). Pomiarów wykonywano dwukrotnie na każdym z poligonów. Dane z pomiarów uzupełniono parametrami geometrycznymi skrzyżowań (szerokości pasów, promienie skrętu, pochylenia podłużne) niezbędnymi w dalszych analizach. Wszystkie te dane potrzebne były do obliczeń rozkładu ruchu na pasy z wykorzystaniem metody MOP-SZS-04 [1].

Przykładowe zestawienie pomierzonych natężeń oraz udziału pojazdów ciężkich (*uc*) w ruchu na pasach obliczeniowych grup W-W-WP (3 badane grupy) przedstawiono w tabeli 1. Charakterystyczny jest rozkład udziału pojazdów ciężkich w grupie pasów, relatywnie mały udział na pasie lewym (1) i znacznie większy na pasach środkowym (2) i prawym (3). Samochody ciężarowe często poruszały się pasem środkowym, nie blokowanym przez skręcające w prawo pojazdy, natomiast pasem prawym autobusy komunikacji miejskiej. Największe natężenie relacji na wprost przypada na pas lewy (najszybszy), mniejsze na pas środkowy (z uwagi na większy udział pojazdów ciężarowych), a najmniejsze na pas prawy (większość pojazdów przemieszcza się na długich odcinkach arterii pasami lewym i środkowym, a pasem prawym pojazdy opuszczające arterię na kolejnych skrzyżowaniach).

Tabela 1

Pomierzone natężenia ruchu i udziały pojazdów ciężkich na skrzyżowaniach z grupami pasów W-W-WP											
Skrzyżowanie	Włot	Pomiar	Q_{w1}	u_{c1}	Q_{w2}	u_{c2}	Q_{w3}	u_{c3}	Q_{p3}	u_{cp3}	Q_w
			P/h	%	P/h	%	P/h	%	P/h	%	P/h
Opolska – Bat. Skąta AK	zachodni	1	645	0,6	578	12,3	365	14,5	166	0,0	1588
		2	549	0,9	531	7,5	290	13,1	100	2,0	1370
	wschodni	1	603	4,1	508	27,0	271	23,2	163	14,1	1382
		2	551	3,1	514	14,2	280	13,9	151	13,2	1345
Opolska – Pleszowska	wschodni	1	659	0,3	636	2,2	193	5,2	299	1,0	1488
		2	578	0,0	571	1,6	190	3,2	285	1,1	1339

W tabeli 2 zestawiono pomierzone natężenia oraz udziały pojazdów ciężkich w ruchu na pasach obliczeniowych grup W-WP (5 badanych grup). W grupach tych zdecydowanie większy udział pojazdów ciężkich przypada na pas prawy (2), natomiast zdecydowanie większa część natężenia relacji na wprost przypada na pas lewy (1). Wyjątkiem jest para skrzyżowań ul. 29 Listopada z ulicami Nad Strugą i Dobrego Pasterza, gdzie na pasie prawym łączne natężenie relacji na wprost i w prawo jest większe niż na pasie lewym. Decyduje o tym organizacja ruchu na skrzyżowaniu poprzedzającym (rys. 4), gdzie na pasie lewym razem z relacją na wprost występuje kolizyjny skręt w lewo.

Tabela 2

Pomierzone natężenia ruchu i udziały pojazdów ciężkich na skrzyżowaniach z grupami pasów W-WP											
Skrzyżowanie	Włot	Pomiar	Q_{w1}	u_{c1}	Q_{w2}	u_{c2}	Q_{p2}	u_{cp2}	Q_w		
			P/h	%	P/h	%	P/h	%	P/h		
Armii Kraj. – Zarzeczce	północny	1	504	1,8	238	19,3	186	0,0	742		
		2	433	1,2	219	9,6	210	1,4	652		
Brożka – Borsucza	zachodni	1	468	0,4	324	1,2	73	0,0	792		
		2	557	0,9	321	9,3	113	0,0	878		
Zakopiańska – Zawila	północny	1	425	1,4	316	7,0	71	2,8	741		
		2	478	1,3	348	10,3	76	0,0	826		
29 Listopada – Dobrego Past.	południowy	1	468	7,5	377	12,7	172	3,5	845		
		2	487	1,6	317	5,0	146	0,0	804		
29 Listopada – Nad Strugą	północny	1	451	6,2	540	15,9	105	0,0	991		
		2	422	5,0	542	18,8	153	0,0	964		

W grupie pasów LW-W (3 badane grupy) dało się zauważyć znacznie większe natężenie jak i udział pojazdów ciężkich relacji na wprost na pasie prawym, przeznaczonym wyłącznie dla tej relacji, zwłaszcza przy większych natężeniach relacji skrętu w lewo (na objętych badaniami skrzyżowaniach skręt w lewo odbywał się kolizyjnie z ruchem pojazdów z przeciwnego wlotu oraz ruchem pieszych).

W grupie pasów LW-WP (4 badane grupy) potwierdził się wpływ blokowania pasów przez pojazdy skręcające na wybór pasa przez pojazdy na wprost. W większości przypadków występowało większe blokowanie pasa lewego, stąd też jadący na wprost częściej wybierali pas prawy (WP).

Tylko na jednym skrzyżowaniu zarejestrowano większe natężenie relacji na wprost na pasie lewym (LW) z uwagi na bardzo małe (rzędu kilkunastu pojazdów na godzinę) natężenie relacji w lewo.

Weryfikacja empiryczna modelu obliczeniowego

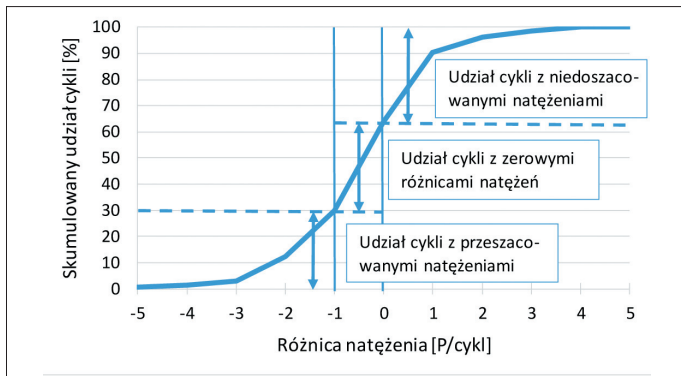
Z uwagi na zmiennoczasowe sterowanie ruchem na większości skrzyżowań analizy rozkładu ruchu na pasy prowadzono w cyklach sygnalizacyjnych. Procedura obliczeniowa objęła:

- przygotowanie bazy danych (liczba pojazdów poszczególnych relacji, lekkich i ciężkich na każdym z pasów obliczeniowej grupy w cyklach sygnalizacyjnych, liczba pojazdów i pieszych mających pierwszeństwo przejazdu/przejścia w cyklach sygnalizacyjnych – w przypadku występowania relacji o kolizyjnym przebiegu, długość sygnału zielonego, „zielonej strzałki” – jeśli występowała długość cyklu sygnalizacyjnego);
- obliczenie dla każdego cyklu sygnalizacyjnego udziału pojazdów skręcających, udziału pojazdów ciężkich oraz stopnia obciążenia pasów z relacjami nadrzędnymi (w przypadku analizy skrętu w lewo o kolizyjnym przebiegu);
- obliczenie dla poszczególnych relacji i pasów natężeń nasycenia procedurą stosowną do przebiegu relacji, bezkolizyjny lub kolizyjny z ruchem pieszych ewentualnie ruchem pojazdów z przeciwnego wlotu i ruchem pieszych na wylocie, w który kieruje się relacja w lewo (konieczne było dostosowanie metody obliczeniowej do prowadzenia analizy w cyklach sygnalizacyjnych);
- rozłożenie natężenia relacji na wprost na poszczególne pasy obliczeniowej grupy w procedurze iteracyjnej.

Niezbędne w obliczeniach parametry geometryczne przyjęto na podstawie planów sytuacyjnych skrzyżowań, natomiast dla parametrów opisujących procesy ruchu na skrzyżowaniu (np. proces akceptacji luk w potoku nadrzędnym przez pojazdy skręcające w lewo) przyjęto wartości rekomendowane w MOP-SZS-04 [1]. Obliczenia wykonano zarówno dla udziału pojazdów ciężkich uc odnoszącego się do całej obliczeniowej grupy pasów oraz dla udziałów uc_i właściwych dla każdego pasa ruchu w obliczeniowej grupie.

Uzyskane wyniki analitycznego rozkładu ruchu na pasy porównano z wartościami uzyskanymi empirycznie. Porównania prowadzono w skali cykli sygnalizacyjnych, jak również w dłuższych okresach 15-minutowych oraz godziny. Analiza w skali cykli sygnalizacyjnych umożliwiła nie tylko porównanie chwilowych wartości natężeń na poszczególnych pasach obliczeniowej grupy, ale także ocenę zmienności w czasie natężeń (szeregi czasowe natężeń) oraz analizę statystyczną dokładności szacowania natężeń w obliczeniowej grupie pasów (dystrybuanty różnic natężeń pomierzonych i obliczonych). Możliwe było określenie udziału cykli z przeszacowanymi, jak i niedoszacowanymi natężeniami (rys. 5).

Przykładowe wyniki analiz prowadzonych w trzypasowej grupie W-W-WP przedstawiają rysunki 6 i 7 oraz tabela 3.

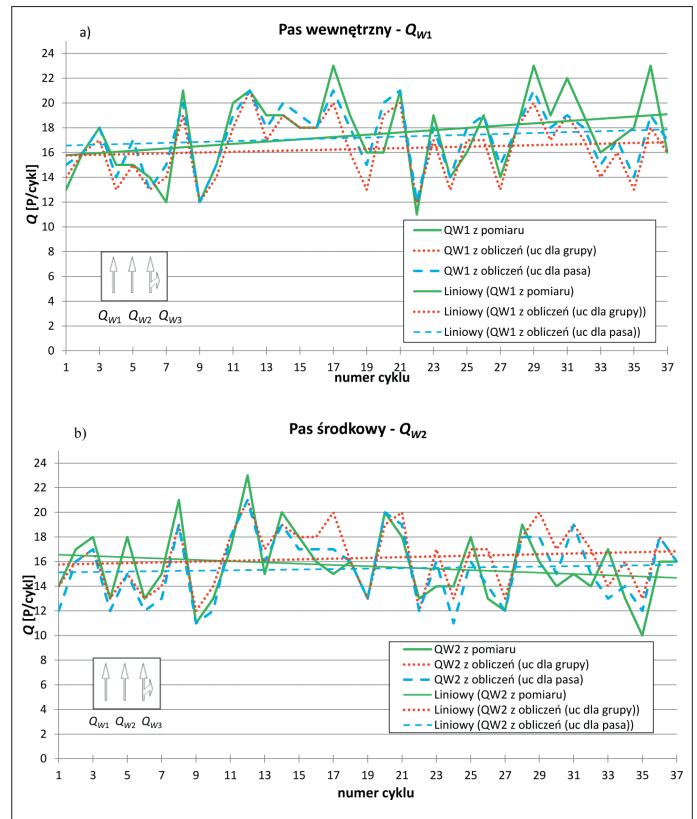


Rys. 5. Interpretacja zgodności natężeń obliczonych z pomierzonymi

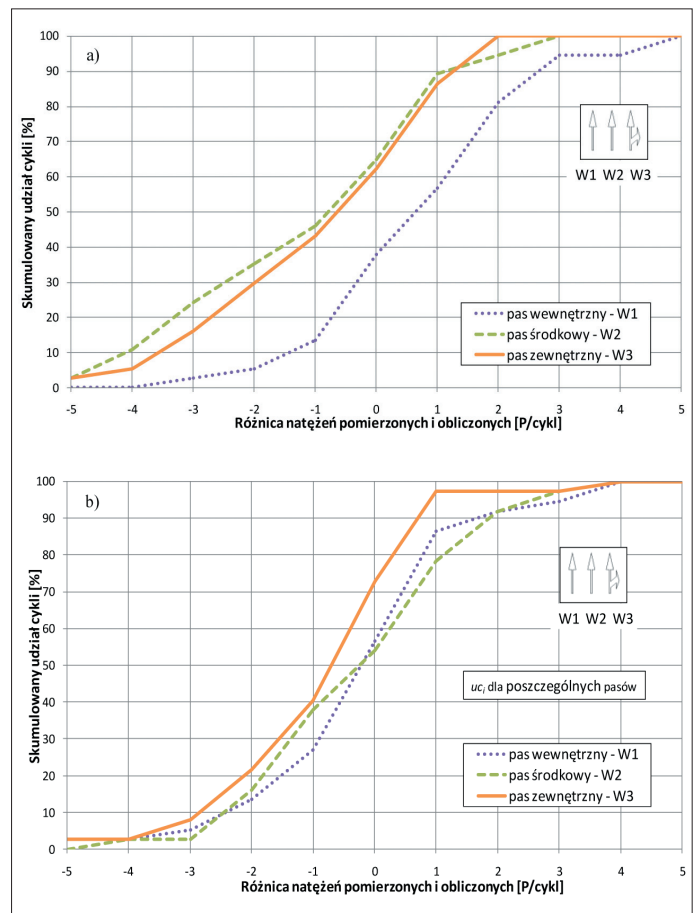
Na pasie wewnętrznym W1 natężenie obliczone jest mniejsze niż pomierzone średnio o około 1.5 P/cykl, 11 P/15 min oraz 42 P/h, czyli o 6,5%. Na pasie środkowym W2 obliczone natężenie jest większe od pomierzonego o 25 P/h, tj. 4,3%, a na pasie prawym W3 – większe o 17 P/h, czyli 4,7%. Znacznie mniejsze różnice oszacowania natężenia występują przy udziale pojazdów ciężkich uc_i wyznaczonym indywidualnie dla każdego pasa. Niedoszacowanie lub przeszacowanie mieści się w tym przypadku w przedziale 1,2% – 4,1%. Ogólnie w badanych grupach pasów W-W-WP lepsze wyniki otrzymano przy obliczeniowym rozkładzie ruchu na pasy z uc_i wyznaczonym dla każdego pasa w grupie. Stosując jedną, wspólną wartość udziału pojazdów ciężkich uc dla całej grupy pasów, w obliczeniach rozkładu ruchu na pasy otrzymuje się mniejsze w stosunku do rzeczywistego natężenie rozkładanej relacji na pasach, na których uc_i jest mniejsze od uc dla grupy i odpowiednio większe natężenie na pasach z uc_i większym od uc . Większy udział pojazdów ciężkich na pasie powoduje pogorszenie warunków ruchu (mniejsza przepustowość), co często skutkuje wyborem innego pasa w grupie przez dojeżdżające pojazdy, a więc mniejszym natężeniem relacji na wprost na danym pasie. Stosując w obliczeniach uc odnoszące się do grupy pasów, mniejsze od rzeczywistego na danym pasie, przydziela się obliczeniowo na ten pas większe natężenie rozkładanej relacji.

Tabela 3

Różnice w kwadransach i w godzinie natężenia pomierzonego i obliczonego na poszczególnych pasach grupy W-W-WP, na wlocie zachodnim skrzyżowania Opolska – Wyki – Bat. Skala AK						
	uc dla grupy pasów			uci dla poszczególnych pasów		
	Q_{w1}	Q_{w2}	Q_{w3}	Q_{w1}	Q_{w2}	Q_{w3}
kwadrans	różnice natężenia w kolejnych kwadransach [P/15 min]					
1	3	7	-10	-4	13	-9
2	11	-8	-3	3	0	-3
3	5	-6	1	-6	2	4
4	23	-18	-5	16	-8	-8
średnia arytmetyczna	10,5	-6,3	-4,3	2,3	1,8	-4,0
odchylenie standardowe	9,0	10,3	4,6	9,9	8,7	5,9
	różnice natężenia w godzinie [P/h]					
	42	-25	-17	8	7	-15
	6,5%	-4,3%	-4,7%	1,2%	1,2%	-4,1%



Rys. 6. Zmienność w czasie (w cyklach sygnalizacyjnych) natężeń pomierzonych i obliczonych w grupie pasów W-W-WP na wlocie skrzyżowania Opolska–Wyki–Bat. Skala AK, wlot zachodni



Rys. 7. Dystrybuanty różnic natężeń w cyklach sygnalizacyjnych pomierzonych i obliczonych przy uc wyznaczonym dla całej grupy (a) oraz uc_i wyznaczonym dla każdego pasa (b) w grupie pasów W-W-WP, na wlocie zachodnim skrzyżowania Opolska–Wyki–Bat. Skala AK

Tabela 4

Różnice pomierzonego i obliczonego natężenia relacji na wprost na poszczególnych pasach obliczeniowych grup dwupasowych														
			natężenie pomierzone				różnica pomiędzy natężeniem pomierzonym i obliczonym							
							uc dla grupy pasów				uci dla poszczególnych pasów			
			pomiar 1		pomiar 2		pomiar 1		pomiar 2		pomiar 1		pomiar 2	
			W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2	W1	W2
skrzyżowanie			grupa pasów W-WP											
Armii Krajowej – Zarzecze	wlot	jedn.												
		[P/h]	504	238	433	219	25	-25	15	-15	2	-2	-23	23
	póln.	[%]					5,0	-10,5	3,5	-6,8	0,4	-0,8	-5,3	10,5
		[P/h]	425	316	478	348	16	-16	11	-11	2	-2	-1	1
Zakopiańska – Zawila	póln.	[%]					3,8	-5,1	2,3	-3,2	0,5	-0,6	-0,2	0,3
		[P/h]	468	324	557	321	-10	10	6	-6	-2	2	0	0
Brozka – Zarzecze	zach.	[%]					-2,1	3,1	1,1	-1,9	-0,4	0,6	0,0	0,0
		[P/h]	454	362	487	317	-51	51	4	-4	-60	60	-9	9
29 Listopada – Nad Strugą – Dobrego Pasterza	połudn.	[%]					-11,2	14,1	0,8	-1,3	-13,2	16,6	-1,8	2,8
		[P/h]	451	540	422	542	-110	110	-149	149	-137	137	-170	170
	póln.	[%]					-24,4	20,4	-35,3	27,5	-30,4	25,4	-40,3	31,4
			grupa pasów LW-W											
Brozka – Borsucza	wsch.	[P/h]	286	299	346	438	53	-53	50	-50	42	-42	28	-28
		[%]					18,5	-17,7	14,5	-11,4	14,7	-14,0	8,1	-6,4
29 Listopada – Nad Strugą – Dobrego Pasterza	połudn.	[P/h]	347	656	337	682	68	-68	3	-3	2	-2	-42	42
		[%]					19,6	-10,4	0,9	-0,4	0,6	-0,3	-12,5	6,2
	póln.	[P/h]	195	704	169	679	40	-40	-9	9	10	-10	-38	38
		[%]					20,5	-5,7	-5,3	1,3	5,1	-1,4	-22,5	5,6
			grupa pasów LW-WP											
Pilotów – Wieniawskiego	połudn.	[P/h]	165	409	197	457	-29	29	-41	41				
		[%]					-17,6	7,1	-20,8	9,0				
	póln.	[P/h]	344	263	365	257	-11	11	10	-10				
		[%]					-3,2	4,2	2,7	-3,9				
Płaszowska – Saska	połudn.	[P/h]	125	270	109	177	-2	2	-1	1				
		[%]					-1,6	0,7	-0,9	0,6				
	póln.	[P/h]	83	267	81	217	-43	43	-35	35				
		[%]					-51,8	16,1	-43,2	16,1				

Analogiczne wnioski odnoszą się do dwupasowych grup o różnej organizacji ruchu W-WP, LW-W i LW-WP. W tabeli 4 zestawiono pomierzone natężenia relacji na wprost na pasach W1 i W2 oraz różnice natężenia pomierzonego i obliczonego (wartości bezwzględne i procentowe) przy u_c wyznaczonym dla całej grupy oraz u_i wyznaczonym dla każdego pasa grupy. Wielkości błędów oszacowania natężeń są zróżnicowane, od kilku pojazdów na godzinę (ułamek procentu natężenia pomierzonego) do kilkudziesięciu pojazdów na godzinę (kilkanaście procent natężenia pomierzonego). Wyjątek stanowią grupy pasów W-WP północny wlot skrzyżowania ulic 29 Listopada – Nad Strugą – Dobrego Pasterza oraz LW-WP na północnym wlocie skrzyżowania ulic Płaszowska – Saska. W pierwszym przypadku determinantą innego niż adekwatny do stopnia nasycenia pasów rozkładu ruchu w analizowanej grupie W-WP jest fakt bliskiego położenia poprzedzającej linii zatrzymań o innej organizacji ruchu LW-W (rys. 4). Na wybór pasa ruchu wpływa znacząco organizacja ruchu przed pierwszą linią zatrzymań od strony dojazdu do skrzyżowania. Taki przypadek powinien być w obliczeniach specjalnie traktowany.

W przypadku skrzyżowania Płaszowska – Saska decydujące znaczenie mogą mieć niewielkie natężenia ruchu na wlotach ulicy Saskiej rzędu 370–550 P/h na dwóch pasach

ruchu oraz znacznie mniejsze natężenia relacji skrętu w prawo niż skrętu w lewo i relatywnie małe natężenia ruchu pieszego, jak też długi sygnał zielony na tym kierunku. Powoduje to płynny ruch na pasie prawym WP, z którego chętniej korzystają pojazdy jadące na wprost (na pasie LW występuje lewoskręt o kolizyjnym przebiegu w fazie sygnalizacyjnej). Przy dobrych warunkach ruchu na pasach wybór pasa ruchu przez kierowców jadących na wprost niekoniecznie zależy więc od takich przesłanek jak długość kolejki (znaczną część pojazdów dojeżdża podczas sygnału zielonego już po rozładowaniu kolejki) czy występowanie pojazdów ciężkich na pasie.

W ramach projektu [5] prowadzono również badania na skrzyżowaniach z sygnalizacją zlokalizowanych poza terenem zabudowy, głównie na drogach krajowych, wykazując specyfikę ich rozwiązań, jak też cech ruchu [6, 7]. Na wlotach tych skrzyżowań, z dwujezdniową drogą z pierwszeństwem przejazdu występowały przeważnie grupy pasów W-WP (do skrętu w lewo służył dodatkowy pas). Na rysunku 8 przedstawiono rozkład ruchu na wprost na pasy, na wlotach z pierwszeństwem przejazdu analizowanych skrzyżowań. W rozkładzie tym wyróżniono pojazdy lekkie i ciężkie. Jak pokazują analizy, prawie we wszystkich przypadkach się pasem lewym (W), natomiast większa liczba pojazdów cięż-

kich pasem prawym (WP). Na 28 rozważanych łącznie wlotów w 18 przypadkach na lewy pas przypada większe natężenie, a w 10 przypadkach na pas prawy.

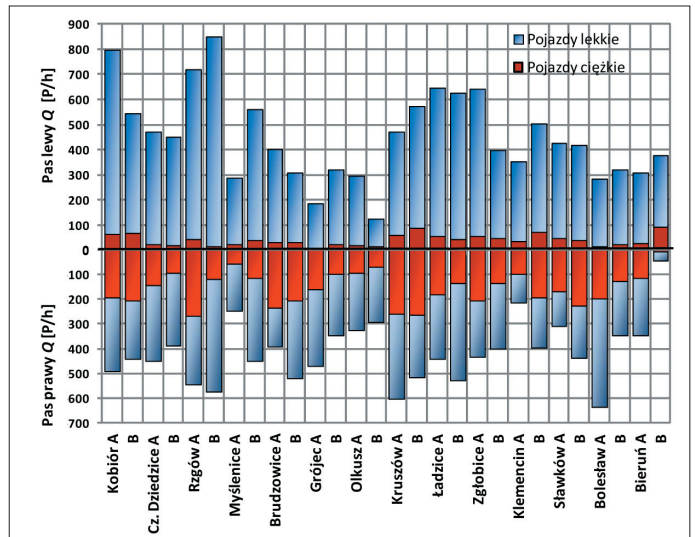
Analiza stopni nasycenia na pasach ruchu na wprost na poszczególnych wlotach wykazała, że częściej większe wartości stopni nasycenia występują na pasie prawym. Wiąże się to z większym udziałem pojazdów ciężkich (fot. 1), a także pojazdów skręcających w prawo, które obniżają natężenie nasycenia prawego pasa ruchu, oraz ze znacznym udziałem pojazdów lekkich, które nawet przy gorszych lokalnie (na wlocie skrzyżowania) warunkach ruchu respektują jako podstawową zasadę poruszania się prawym pasem. Różnice stopni nasycenia na pasie prawym i lewym wykazują tendencję malejącą wraz ze wzrostem natężenia ruchu na pasach prowadzących relację na wprost (rys. 9). Wynika to z istotnego wpływu stanów kolejek na wybór pasa przy większych natężeniach ruchu.

Ponieważ znaczną poprawę dokładności rozkładu ruchu na pasy uzyskuje się stosując w obliczeniach udziały pojazdów ciężkich odnoszące się do poszczególnych pasów grupy, istotne jest rozpoznanie ewentualnych cech zróżnicowania struktury rodzajowej w grupie pasów. Na rysunku 10 przedstawiono zależności ilorazów uc_i/uc (gdzie i oznacza odpowiednio pas lewy lub prawy) od uc w grupach pasów W-WP i LW-W na wlotach badanych skrzyżowań w Krakowie. Udział pojazdów ciężkich na pasie prawym jest zazwyczaj kilkakrotnie większy niż na pasie lewym (wartości uc w grupie pasów nie przekraczały 15%). Takie, przykładowe ujęcie zależności dawałoby możliwość określenia uc_i dla poszczególnych pasów grupy przy znanym uc grupy.

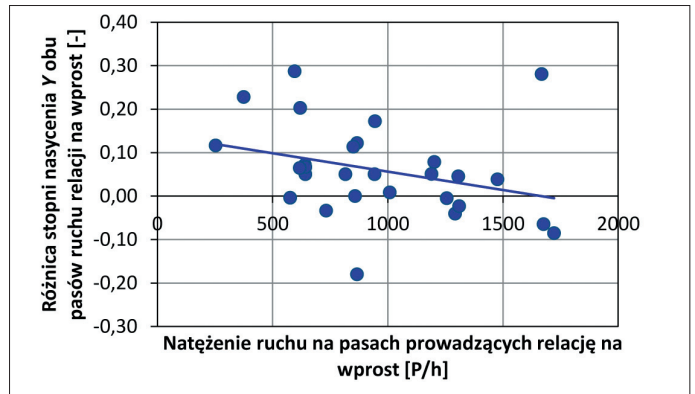
Na wlotach badanych skrzyżowań zamiejskich [5] udział pojazdów ciężkich w ruchu uc wahał się od 7,7% do 31,0%. Średnia wartość uc wyniosła około 21%. Znaczne było zróżnicowanie udziału pojazdów ciężkich na poszczególnych pasach przekrojów dwujezdniowych. Na lewym pasie rzadko uc_i przekraczało 15%, podczas gdy na pasie prawym przekraczało i 50%. Przeciętnie na pasie lewym uc_i wynosiło 11,4%, a na pasie prawym 40,1%. Należy zwrócić uwagę, że dla większych wartości natężenia ruchu Q zaznacza się spadek udziału pojazdów ciężkich uc (rys. 11), choć natężenie ruchu nie jest statystycznie istotny sposób determinującą udział pojazdów ciężkich.



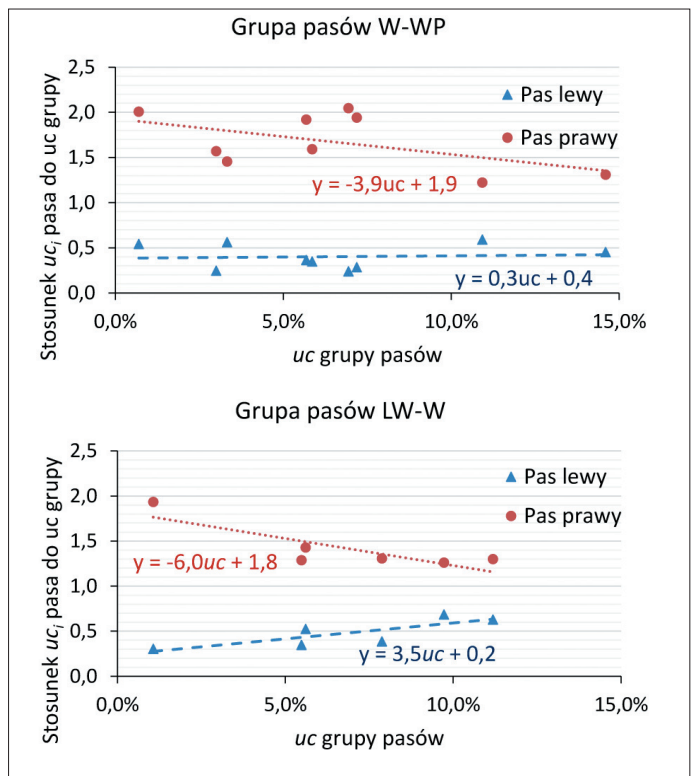
Fot. 1. Zróżnicowany udział pojazdów ciężkich na pasach wlotu skrzyżowania poza terenem zabudowy



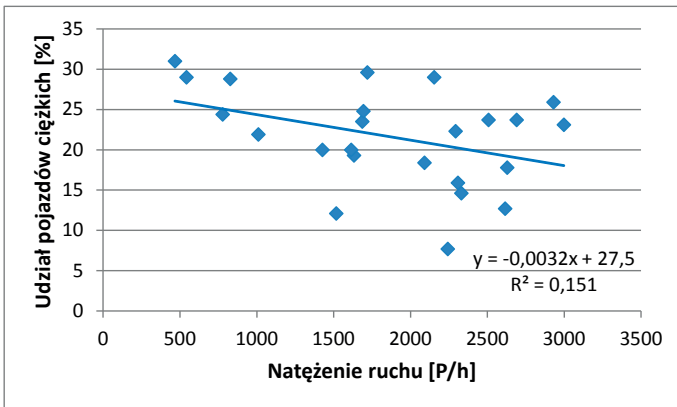
Rys. 8. Rozkład natężenia relacji na wprost, na poszczególne pasy ruchu na wlotach drogi głównej skrzyżowań poza terenem zabudowy z uwzględnieniem struktury rodzajowej [7]



Rys. 9. Różnice stopni nasycenia pasa lewego i prawego na wlotach skrzyżowań poza terenem zabudowy w funkcji natężenia ruchu na tych pasach [7]



Rys. 10. Stosunek uc , pasa ruchu do uc grupy pasów w funkcji uc grupy pasów



Rys. 11. Udział pojazdów ciężkich u_c w funkcji natężenia ruchu Q

Pokazane na rysunku 10 zależności dla skrzyżowań miejskich oraz podane wyżej w tekście i na rys. 11 udziały pojazdów ciężkich na pasach wlotów skrzyżowań poza terenem zabudowy mogą stanowić praktyczne przesłanki w pracach projektowych.

Podsumowanie

Znajomość natężeń poszczególnych relacji na każdym z pasów ruchu wlotu skrzyżowania z sygnalizacją jest niezbędna do prowadzenia obliczeń przepustowości i oceny warunków ruchu polską metodą MOP-SZS-04 [1], jak również kanadyjską [2]. Dane takie w sytuacji analizy istniejących skrzyżowań powinny być ustalane na podstawie pomiarów natężeń ruchu, w tym w przypadku relacji korzystającej z więcej niż jednego pasa ruchu z rozbięciem na poszczególne pasy. W odniesieniu do projektowanych skrzyżowań konieczne jest obliczeniowe określenie natężeń na każdym z pasów przy dostępnych zazwyczaj prognozowanych natężeniach poszczególnych relacji. Polska i kanadyjska metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną zawierają procedurę rozkładu ruchu na pasy relacji korzystających z więcej niż jednego pasa z kryterium równych stopni nasycenia poszczególnych pasów obliczeniowej grupy. Podjęte badania na kilkunastu wlotach skrzyżowań miejskich i kilkudziesięciu wlotach skrzyżowań zamiejskich pozwoliły na ocenę dokładności obliczeniowego szacowania natężeń na pasach grupy.

Przeprowadzone analizy w typowych rozwiązaniach skrzyżowań miejskich wykazały, że różnice oszacowanego natężenia i pomierzonego na danym pasie mogą sięgać 20%, choć w większości przypadków nie przekraczają 10%, a większe różnice względne dotyczą mniejszych natężeń na pasie ruchu. Nie zawsze więc, zwłaszcza przy znacznych rezerwach przepustowości, wybór pasa ruchu na wlocie zależy od występujących na nim warunków. Decydować mogą inne względy, np. kontynuowanie jazdy pasem, którym kierowca poruszał się na odcinku przed skrzyżowaniem, czy też manewr skrętu, jaki zamierza wykonać za skrzyżowaniem. Bliskość kolejnych linii zatrzymań z różną organizacją ruchu może znacząco zmieniać wybór pasa. Przykładem jest skrzyżowanie pokazane na rysunku 4. Poza terenem zabudowy do istotnych czynników, oprócz stopnia nasycenia

pasów, mogą należeć też prędkość (zazwyczaj większe prędkości występują na pasie lewym) czy respektowanie zasady poruszania się prawym pasem.

Istotną rolę w poprawnym rozkładzie ruchu na pasy odgrywa uwzględniany w obliczeniach udział pojazdów ciężkich. Znacznie lepsze wyniki uzyskuje się, stosując w obliczeniach u_c indywidualne dla każdego pasa. Takie dane w przypadku projektowanego skrzyżowania zazwyczaj nie są dostępne, stąd też duże znaczenie mają badania i charakterystyki natężeń ruchu na wlotach skrzyżowań. Oprócz klasycznych pomiarów cyklicznych czy wyrwykowych, w znacznie większej mierze niż to ma miejsce obecnie, powinny być wykorzystywane do uzyskiwania takich charakterystyk systemy detekcji ruchu na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją.

Zasadę wyrównywania stopni nasycenia przyjętą za podstawę rozkładu ruchu na pasy w polskiej i kanadyjskiej metodzie obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją, pomimo wykazanych nieścisłości szacowania natężeń, można uznać za właściwe założenie metodologiczne. Wykorzystując metodę obliczeniową (zwłaszcza program komputerowy), należy zdawać sobie sprawę z zawartych w niej uproszczeń odwzorowania rzeczywistości i przyjętych typowych wartości parametrów. Kluczową rolę w prowadzonych analizach odgrywa przygotowanie i doświadczenie projektanta (analityka) zwłaszcza w zakresie charakterystyki ruchu i funkcjonowania skrzyżowań z uwzględnieniem ich lokalizacji. Wtedy wykorzystanie metody obliczeniowej, po jej skalibrowaniu (dobór założeń i parametrów właściwych dla analizowanego rozwiązania), daje zazwyczaj zadowalające wyniki. W złożonych, nietypowych przypadkach analizy powinny być wsparte modelowaniem symulacyjnym.

Literatura

1. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S., Kieć M., Ostrowski K., *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną (MOP-SZS-04)*, Generalna Dyrekcja Dróg Krajowych i Autostrad, Warszawa 2004.
2. Teply S., Allingham D.I., Richardson D.B., Stephenson B.W., *Canadian Capacity Guide for Signalized Intersection*, Institute of Transportation Engineers, District 7 – Canada, Third edition, Committee on the Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, February 2008.
3. National Research Council, *Highway Capacity Manual 2010*, Transportation Research Board, Washington D.C. 2010.
4. Franczak B., Zuziak M., *Badania rozkładu ruchu w grupach pasów i weryfikacja metodologii rozkładu ruchu według równych stopni nasycenia*. Politechnika Krakowska, Praca dyplomowa magisterska, Kraków 2009.
5. Chodur J., Tracz M., Gondek S., Ostrowski K., Bąk R., *Problemy eksploatacyjne skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na zamiejskich drogach z dużymi prędkościami*, Projekt Badawczy Własny NCN nr N N509 254037, Kraków 2012.
6. Chodur J., Tracz M., *Specyfika skrzyżowań z sygnalizacją świetlną zlokalizowanych poza terenem zabudowy*, „Drogownictwo” 2014, nr 3.
7. Chodur J., *Charakterystyka natężeń ruchu na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją*, „Technika Transportu Szynowego” 2012, nr 9.