

Funkcjonowanie pasa ruchu z dwiema grupami sygnałowymi na skrzyżowaniach z sygnalizacją¹

RADOSŁAW BĄK

mgr inż., Politechnika Krakowska,
Katedra Budowy Dróg i Inżynierii
Ruchu, ul. Warszawska 24,
31-155 Kraków,
tel. +48 12 628 25 21,
e-mail: rbak@pk.edu.pl

Streszczenie: W ostatnich latach na wybranych skrzyżowaniach w Krakowie wdrożono w szerszym zakresie organizację ruchu, w której nad jednym z pasów ruchu stosuje się dwa sygnalizatory należące do różnych grup sygnałowych. Wówczas pojazdy dwóch relacji korzystające z pasa ruchu mogą mieć w innym czasie przyznawany sygnał zielony. Rozwiązanie to nie było dotychczas szczegółowo analizowane pod kątem bezpieczeństwa i sprawności ruchu. W artykule przedstawiono wstępne analizy bezpieczeństwa dla tego typu rozwiązań w oparciu o dane wypadkowe zebrane ze skrzyżowań w Krakowie. Głównym celem artykułu jest przedstawienie sposobu obliczania przepustowości pasa ruchu sterowanego dwiema grupami sygnałowymi, bazującego na prawdopodobieństwie wystąpienia blokowania się pojazdów jednej relacji przez drugą. Opracowany model obliczeniowy zweryfikowano za pomocą symulacji komputerowej. Wyniki wskazują, że opisywane rozwiązanie może być bezpiecznym i skutecznym środkiem poprawy warunków ruchu na skrzyżowaniu.

Słowa kluczowe: ruch, skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną, przepustowość skrzyżowania, rozkład ruchu na pasy, bezpieczeństwo ruchu

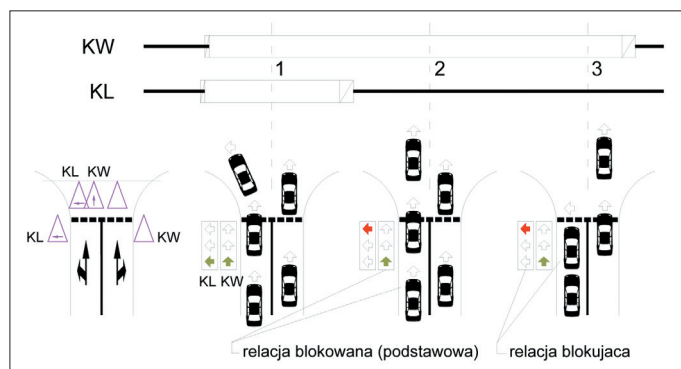
Wprowadzenie

Sygnalizacja świetlna jest stosunkowo tanim i skutecznym środkiem organizacji ruchu, umożliwiającym sprawne i bezpieczne prowadzenie potoków ruchu o dużych natężeniach przez skrzyżowania. Jej zastosowanie jest szczególnie przydatne w sytuacji, gdy nie jest możliwe zaprojektowanie rond cechujących się wyższym poziomem bezpieczeństwa (jednopasowych bądź rond turbinowych), np. na skutek braku dostępności terenu czy prowadzenia równoległe do ulicy linii tramwajowej. Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną stosowane są głównie na drogach i ulicach o przekrojach wielopasowych, w przypadku których korzyści związane z sygnalizacją są większe, a inne typy skrzyżowań często nie są możliwe do zastosowania lub nie spełniają podstawowych wymagań sprawności i bezpieczeństwa ruchu [1, 2].

Sprawność ruchowa, obok bezpieczeństwa, jest jednym z kluczowych kryteriów projektowania skrzyżowań. Przy projektowaniu nowych obiektów uzyskanie korzystnych efektów w tym zakresie jest możliwe dzięki wzajemnemu dostosowaniu układu geometrycznego, rozwiązania technicznego oraz sposobu organizacji i sterowania ruchem na skrzyżowaniu [3]. Spójność geometrii, organizacji ruchu oraz rozwiązania i układu faz sygnalizacyjnych w dostosowaniu do natężeń ruchu znacząco ułatwia zapewnienie wymaganej przepustowości całego skrzyżowania.

W warunkach miejskich projektowanie geometrii skrzyżowania napotyka na szereg ograniczeń. Liczba podstawowych pasów ruchu determinowana jest przekrojem ulicy, natomiast liczba pasów dodatkowych głównie dostępnością terenu. Szczególnie istotnym ograniczeniem podlega także długość dodatkowych pasów ruchu przeznaczonych dla relacji skrętnych. Wówczas przestrzeń optymalizacji cech geometrycznych mocno zawęża się, a większego znaczenia nabiera organizacja ruchu (układ pasów) powiązana ze sposobem sterowania ruchem na skrzyżowaniu.

W sytuacji niedostatecznej liczby pasów ruchu, w tym wydzielonych dla relacji skrętu w lewo, możliwe do zastosowania jest rozwiązanie dopuszczone przepisami [4], polegające na instalacji dwóch sygnalizatorów należących do różnych grup sygnałowych. W takiej sytuacji pojazdy poruszające się danym pasem ruchu mogą mieć przyznany sygnał zielony w różnych okresach cyklu. Przykład taki z prezentacją sytuacji ruchowej w trzech okresach nadawania sygnału zielonego oraz nazewnictwem wykorzystanym w niniejszym artykule pokazano na rysunku 1.



Rys. 1. Koncepcja funkcjonowania pasa ruchu z dwiema niezależnymi grupami sygnałowymi

Ten sposób organizacji ruchu jest rzadko spotykany, głównie z uwagi na obawy co do zachowania kierujących w konfrontacji z nietypowym układem sygnalizatorów na wlocie. Natomiast w pewnych specyficznych przypadkach rozwiązanie takie może być korzystne z uwagi na sprawność skrzyżowania, pomimo możliwości blokowania wjazdu na skrzyżowanie relacji, która ma sygnał zielony przez relację z tego samego pasa mającą w tym samym czasie sygnał czerwony. Ocena korzyści, jakie może dać wprowadzenie niezależnego wyświetlania sygnałów zielonych dla różnych relacji poruszających się tym samym pasem ruchu, jest znacznie utrudniona ze względu na brak możliwości wyznaczenia przepustowości takiego pasa ruchu za pomocą

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2016.

dostępnych metod obliczeniowych. Ograniczenia krajowej metody MOP-SZS-04 [5], wynikające przede wszystkim z jej podstawowego przeznaczenia jako narzędzia projektowego, stanowią przeszkodę w ocenie warunków ruchu skrzyżowań, których układ pasów i układ sterowania są nietypowe. Tymczasem często istnieje potrzeba oceny doraźnej zmiany w organizacji ruchu na wlotach (przeznaczeniu pasów ruchu), np. z powodu spodziewanego wzrostu natężeń ruchu przy braku możliwości korekty geometrii skrzyżowania.

W artykule przedstawiono wyniki obserwacji funkcjonowania wlotów skrzyżowań z pasami ruchu sterowanymi dwiema grupami sygnałowymi oraz propozycję rozszerzenia metody obliczeniowej o tego typu przypadki wlotów, wykorzystując metody probabilistyczne.

Funkcjonowanie pasa z dwiema grupami sygnałowymi

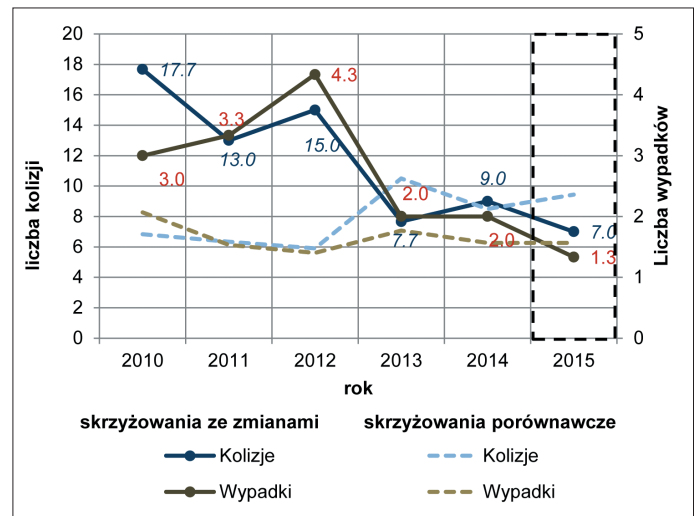
Rozwiązanie w postaci niezależnego przyznawania sygnału dla poszczególnych strumieni ruchu korzystających z tego samego pasa ruchu dopuszcza załącznik nr 3 do rozporządzenia [4]. W takiej sytuacji strumienie ruchu obsługiwane są jako grupy bezkolizyjne (poprzez sygnalizatory S-3). Niezależne wyświetlanie sygnałów dla poszczególnych grup może być korzystne z kilku względów:

- bezkolizyjnej obsługi relacji skrętnych w przypadku braku możliwości poszerzenia wlotu o dodatkowy pas ruchu, przy utrzymaniu zwiększonej przepustowości relacji podstawowych (na wprost);
- skrócenia czasów międzyzielonych dla jednego ze strumieni ruchu;
- lepszego dostosowania przeznaczenia pasów ruchu do zmiennej struktury kierunkowej w dobie.

Przykładem zastosowania niezależnego sterowania strumieniami ruchu z jednego pasa ruchu mogącego prowadzić do blokowania jednej relacji przez drugą są skrzyżowania Andersa – Ludźmierska, Jana Pawła II – Zachemskiego czy Jana Pawła II – Bulwarowa – T. Ptaszyckiego – Klasztorna w Krakowie. Wdrożeniu systemu dynamicznego sterowania ruchem nie towarzyszyła przebudowa wlotów skrzyżowań. Skrzyżowania te funkcjonowały uprzednio z sygnalizacją dwufazową, która, mimo zapewnienia dobrych warunków ruchu, nie spełniała wymagań kryterium bezpieczeństwa. Z uwagi na dużą liczbę wypadków i kolizji na tarczy skrzyżowania, w tym z tramwajami i pieszymi, zdecydowano się na zastosowanie sygnalizatorów kierunkowych w lewo z drogi nadrzędnej o przekroju 2x2. Umieszczenie sygnalizatorów kierunkowych dla dwóch relacji nad pasem wewnętrznym dało szansę na połączenie bezkolizyjnego sterowania ruchem relacji skrętu w lewo i jednocześnie zapewnienie przepustowości relacji na wprost, która przy zastosowaniu klasycznej organizacji ruchu korzystałaby tylko z jednego pasa ruchu.

W celu weryfikacji efektów zastosowanego rozwiązania pod kątem bezpieczeństwa ruchu, przeprowadzono porównanie liczby zdarzeń przed i po wprowadzeniu zmian w organizacji ruchu na wlotach. Wyniki przedstawiono na ry-

sunku 2 oraz w tabeli 1. Liczba zdarzeń (wypadków i rejestrowanych kolizji) na skrzyżowaniach od 2010 roku sukcesywnie maleje. Wprowadzenie niestandardowej organizacji ruchu na wlotach skrzyżowań nie wpłynęło w sposób niekorzystny na ogólną wypadkowość na skrzyżowaniach. Przedstawiony na rysunku 2 spadek liczby wypadków w 2013 roku może częściowo wynikać ze zmniejszonego natężenia ruchu, związanego z przebudową alei Jana Pawła II na sąsiadującym odcinku ulicy, natomiast nowa organizacja ruchu obowiązywała od końca 2014 roku. Jednocześnie na innych, istotnych ruchowo skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną w Krakowie, na których nie wprowadzono zmian organizacji ruchu oraz korekt programów sygnalizacji świetlnej, liczba wypadków i kolizji utrzymuje się na zbliżonym poziomie, nie wykazując trendu malejącego.



Rys. 2. Obserwowany trend wypadków i kolizji na skrzyżowaniach ze zmienioną organizacją ruchu na przełomie 2014 i 2015 r.

W tabeli 1 zestawiono liczbę wypadków i kolizji bezpośrednio powiązanych z relacjami na skrzyżowaniu, których dotyczyły zmiany organizacji ruchu i sterowania, tj. relacji skrętu w lewo obsługiwanych uprzednio jako kolizyjne z ruchem z przeciwnego wlotu, tramwajem oraz pieszymi. Zarówno liczba wypadków, jak i rejestrowanych kolizji uległa wyraźnemu zmniejszeniu. Tylko na jednym ze skrzyżowań zarejestrowano trzy kolizje wynikające ze zmiany pasa ruchu na wlocie skrzyżowania przez pojazdy, prawdopodobnie związanej z blokowaniem relacji na wprost przez relację skrętną w lewo.

Na skrzyżowaniu alei Jana Pawła II z ulicą Zachemskiego na jednym z wlotów, ze względu na uwarunkowania układu sieci ulicznej w obszarze, zastosowano klasyczny układ sygnalizatorów dopuszczający przejazd relacji na wprost tylko

Tabela 1

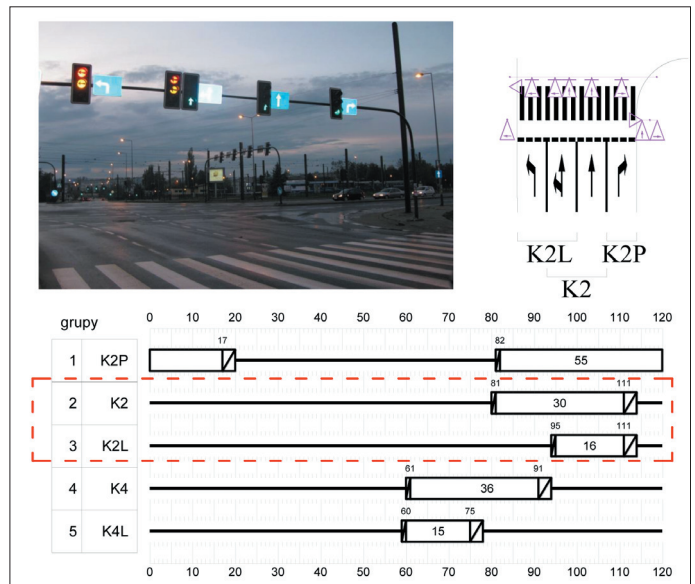
Zdarzenia na skrzyżowaniach przed i po zastosowaniu nowego układu faz		
skrzyżowanie	przed (W+K)	po (W+K)
Andersa – Ludźmierska	4+5	0+3
Jana Pawła II – Zachemskiego	0+2	0+0
Jana Pawła II – Klasztorna	0+3	0+0

z jednego pasa ruchu (pas wewnętrzny przeznaczono dla relacji w lewo i zawracania). Na wskazanym wlocie po wprowadzeniu zmian zarejestrowano 4 kolizje związane ze zmianą pasa ruchu. Zdarzenia te wynikać mogą z konieczności zmiany pasa w celu kontynuacji jazdy na wprost (co jest uznawane za jeden z podstawowych błędów projektowych [1]) oraz przeciążenia zewnętrznego pasa ruchu.

Przytoczone dane wypadkowe wskazują na możliwe zmniejszenie wypadkowości, jednakże przy niewielkiej liczbie zdarzeń nie ma podstaw do wykazania statystycznej istotności różnic liczby zdarzeń, toteż przedstawione stwierdzenia mają głównie charakter inżynierskiego spostrzeżenia. Mała liczebność próby oraz krótki okres obserwacji po wprowadzeniu zmian na skrzyżowaniu (1 rok) nie przesądza o wpływie niezależnego sterowania ruchem dla dwóch relacji korzystających z jednego pasa ruchu na bezpieczeństwo, natomiast wskazuje, że rozwiązania te mogą być bardziej bezpieczne niż inna, typowa organizacja ruchu, jednakże gorzej dostosowana do natężeń panujących na wlocie. Wiarygodna ocena redukcji zdarzeń wymagać będzie wydłużenia okresu obserwacji po wprowadzeniu zmian umożliwiającego zastosowanie aparatu statystyki matematycznej do oceny zmian wypadkowości.

W przypadku występowania na wlocie skrzyżowania większej liczby pasów ruchu istotną kwestią do rozstrzygnięcia jest ich przeznaczenie. W takiej sytuacji liczba pasów ruchu przeznaczonych dla poszczególnych relacji, oprócz ograniczeń geometrycznych odcinków dojazdowych i wylotów, powinna wynikać ze struktury kierunkowej ruchu na wlocie. W sytuacji zauważanej zmienności udziału poszczególnych relacji na wlocie w różnych okresach dnia, celowym może być zastosowanie sterowania wlotami przy jednoczesnym zastosowaniu pasa ruchu obsługującego więcej niż jedną relację. Rozwiązanie takie posiada jednak istotne wady, wynikające ze znacznego usztywnienia sposobu sterowania ruchem na skrzyżowaniu, prowadzącego do powstania dysproporcji w stopniach obciążenia w poszczególnych obliczeniowych grupach pasów na danym i przeciwnym wlocie skrzyżowania. Odpowiedzią na taką sytuację może być zastosowanie niezależnego sterowania dla poszczególnych relacji. Wówczas z jednej strony utrzymywana jest możliwość rozkładu ruchu na pasy stosownie do potrzeb w poszczególnych okresach dnia, a jednocześnie możliwe jest zachowanie sterowania czterofazowego uwzględniającego obciążenie pasów ruchu na przeciwnym wlocie. Rozwiązanie tego typu funkcjonuje na wlocie ulicy Tischnera przy skrzyżowaniu ulicy Wadowickiej, Zakopiańskiej i Brożka w Krakowie (rys. 3).

Skrzyżowanie to stanowi przykład poprawy efektywności wykorzystania pasów ruchu w szczycie porannym oraz popołudniowym. W szczycie porannym dominującymi relacjami są na wprost i w prawo (grupy K2 i K2P), natomiast mniejsze jest natężenie relacji skrętnej w lewo. W szczycie popołudniowym natężenie relacji skrętnej w lewo na wlocie wyraźnie rośnie, natomiast z wlotu przeciwnego (K4L) jest znacznie mniejsze (103P/h), podczas gdy relacja na wprost cechuje się zbliżonymi natężeniami



Rys. 3. Przykłady organizacji ruchu na wlocie ul. Tischnera przy skrzyżowaniu ul. Wadowicka – Brożka w Krakowie

do wlotu przeciwnego (951 P/h wobec 866 P/h). Możliwość jazdy z dwóch pasów ruchu prowadzi do wzrostu przepustowości wlotów dzięki możliwości lepszego dostosowania długości sygnałów do natężeń ruchu. Objaśnienie tej sytuacji przedstawiają zamieszczone w tabeli 2 wyniki obliczeń stopni nasycenia i obciążenia wybranych relacji. Porównano w niej dwa warianty klasycznej organizacji ruchu na wlocie. Wariant I oznacza dwie niezależne grupy sygnałowe (2 pasy relacji na wprost i jeden pas relacji w lewo), natomiast wariant II zastosowanie istniejącego układu pasów ruchu, ale jako jednej grupy sygnałowej (przypadek sterowania wlotami K2 i K4). Jak widać, w pierwszym wariantcie następuje wyczerpanie przepustowości relacji skrętu w lewo, natomiast sterowanie wlotami generalnie pogarsza warunki ruchu na analizowanym wlocie, jak i na wlocie przeciwnym (stopień nasycenia relacji w lewo wynosi 0.06 wobec 0.260 dla relacji na wprost).

Oprócz wymienionych korzystnych efektów opisywanego rozwiązania układu sygnalizatorów posiada ono również istotne wady. Blokowanie przejazdu pojazdów jednej relacji przez drugą jest źle odbierane przez kierowców i może prowadzić do nieprzepisowych i niebezpiecznych zachowań –

Tabela 2

Obliczenia stopni nasycenia (iloraz natężenia ruchu i natężenia nasycenia) i obciążenia (iloraz natężenia ruchu i przepustowości) dla wariantów organizacji ruchu na wlocie ul. Tischnera				
skrzyżowanie	szczyt poranny		szczyt popołudniowy	
	relacja na wprost	relacja w lewo	relacja na wprost	relacja w lewo
wariant I				
natężenie ruchu Q , [P/h]	805	284	866	388
sygnał zielony G [s]	25	15	30	16
stopień nasycenia γ [-]	0.219	0.165	0.236	0.225
stopień obciążenia X [-]	0.98	1.19	0.88	1.53
wariant II				
sygnał zielony G [s]	21	21	23	23
stopień obciążenia X [-]	1.16	0.87	1.14	1.09

przede wszystkim zmiany pasa ruchu bezpośrednio na wlocie skrzyżowania w warunkach ograniczonej widoczności wykonywania tego typu manewru.

Kolejną przeszkodą jest brak możliwości analitycznego oszacowania przepustowości przy zastosowaniu niezależnego przyznawania sygnału zielonego dla relacji korzystających z jednego pasa ruchu. Na skutek braku odpowiednich narzędzi, podjęcie racjonalnej decyzji co do przeznaczenia pasów ruchu uwzględniających możliwość zastosowania dwóch grup sygnałowych dla jednego pasa ruchu jest utrudnione. W związku z powyższym, zaproponowano uproszczony model obliczeniowy, który może wypełnić lukę w tym zakresie.

Model obliczeniowy dla pasa z dwiema grupami sygnałowymi

Metoda [5] nie obejmuje specyficznego przypadku, gdy z jednego pasa ruchu korzystają dwie relacje otrzymujące sygnał zielony o różnej długości.

W celu oszacowania przepustowości pasa ruchu w sytuacji, gdy pojazdy jednej z relacji mogą uniemożliwić przejazd innym, dla których wyświetlany jest sygnał zezwolenia na ruch, opracowano prosty model bazujący na prawdopodobieństwie blokowania pojazdów jednej relacji przez pojazdy drugiej. Budowa tego modelu wymagała przyjęcia następujących założeń upraszczających:

- na wlocie skrzyżowania występuje pas ruchu sterowany dwiema grupami sygnałowymi;
- potok zgłoszeń pojazdów na pasie ruchu (odstęp czasu między pojazdami) opisany jest rozkładem wykładniczym przesuniętym, przy czym prawdopodobieństwo wyboru kierunku na skrzyżowaniu przez dany pojazd jest niezależne od momentu zgłoszenia, jak również od pozostałych zgłoszeń na wlocie;
- początek lub koniec sygnału zielonego dla obu relacji następują w tym samym momencie (drugi przypadek przedstawia rys. 4);
- w okresie nadawania sygnału zielonego tylko dla jednej relacji następuje zjazd pojazdów tej relacji ze stałym odstępem h , aż do pojawienia się na linii zatrzymania pojazdu relacji blokującej; do tego momentu pojazdy opuszczają wlot skrzyżowania z natężeniem nasycenia S_p wyznaczanym zgodnie z MOP-SZS-04;
- w okresie nadawania sygnału zielonego dla obu relacji zjazd pojazdów odbywa się zgodnie z natężeniem nasycenia pasa ruchu wyznaczanym jako ważona średnia harmoniczna natężeń nasycenia obu relacji.

Relację z dłuższym sygnałem oznaczono jako podstawową P (zwykle jest to relacja na wprost, cechująca się większym natężeniem ruchu), natomiast drugą relację blokującą jako BL. Do opracowania modelu przyjęto następujące oznaczenia:

- S_p, S_{BL}, S_j – natężenia nasycenia wyznaczone wg MOP-SZS-04 przy założeniu braku blokowania odpowiednio dla relacji podstawowej, relacji blokującej i pasa ruchu;

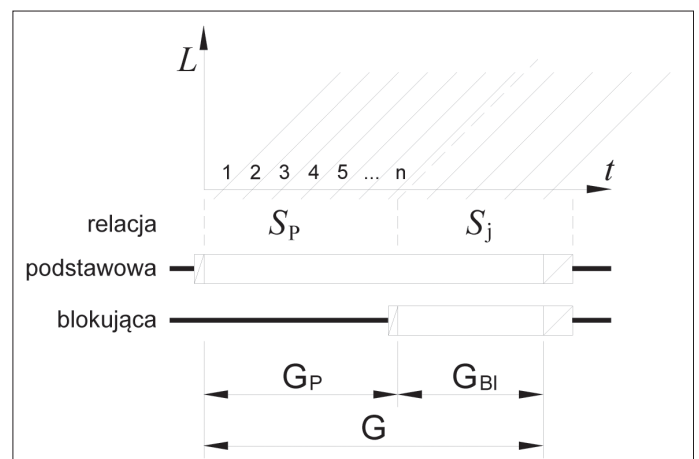
- G, G_{BL}, G_p – rzeczywista długość sygnału zielonego grupy sygnałowej obsługującej relację podstawową, grupy obsługującej relację blokującą oraz różnica długości sygnałów zielonych G_p wyznaczająca interwał, w którym może następować wyłącznie zjazd relacji podstawowej;
- Q_p, Q_{BL} – natężenie ruchu relacji podstawowej i mogącej blokować przejazd;
- u_p, u_{BL} – udział relacji na pasie: podstawowej i mogącej blokować przejazd;
- k – numer pojazdu w kolejce blokującej przejazd relacji podstawowej;
- n – liczba pojazdów relacji podstawowej, jaka może przejechać linię zatrzymania przy natężeniu nasycenia S_p w interwale G_p jeśli blokowanie nie wystąpi.

Ideę modelu obliczeniowego przedstawia rysunek 4. Pojazdy relacji podstawowej 1, 2, 3, ... k , przejeżdżają linię zatrzymania aż do momentu, gdy k -ty pojazd w kolejce będzie poruszać się w relacji blokującej. Wówczas linię zatrzymania w trakcie sygnału zielonego może opuścić $k-1$ pojazdów relacji podstawowej. Maksymalna liczba pojazdów, jaka może przejechać podczas sygnału zielonego nadawanego wyłącznie dla relacji podstawowej G_p (przy braku blokowania) jest równa n , którą można obliczyć ze wzoru:

$$n = \frac{S_p G_p}{3600} \quad (1)$$

Obliczoną wartość n należy zaokrąglić do wartości całkowitej.

W przypadku gdy $k > n$ blokowanie nie wystąpi i cały sygnał G będzie wykorzystany na zjazd kolejki pojazdów. Natężenie nasycenia dla takiego przypadku można wyznaczyć, uwzględniając różne wartości odstępów średnich potoku pojazdów w poszczególnych okresach sygnału zielonego. W okresie G_p będzie to natężenie nasycenia relacji podstawowej, natomiast w okresie jednoczesnego sygnału zielonego przybliżoną wartość natężenia nasycenia można obliczyć wg MOP-SZS-04 jak dla pasa, z której korzystają dwie relacje.



Rys. 4. Modelowy diagram droga-czas stanowiący podstawę do wyznaczenia przepustowości pasa ruchu (brak sytuacji blokowania relacji podstawowej)

$$S_G = \frac{S_P G_P + S_j G_{Bl}}{G} \quad [\text{P/hz}] \quad (2)$$

Do wyznaczenia wartości S_j można w uproszczeniu założyć zachowanie udziału relacji podstawowej i blokującej na pasie, czyli z pominięciem faktu, że część pojazdów relacji podstawowej opuszczać będzie wlot w innym okresie cyklu (interwale G_p).

Przy założeniu, że zgłoszenia kolejnych pojazdów są niezależne, prawdopodobieństwo p_{bk} , że przez cały okres sygnału zielonego relacji podstawowej G_p będzie możliwy zjazd pojazdów, można obliczyć jako n -wyrazową wariację z powtórzeniami. Jeśli prawdopodobieństwo zgłoszenia jednego pojazdu relacji podstawowej jest równe jego udziałowi w potoku ruchu u_p to:

$$p_{bk} = u_p^n \quad (3)$$

W podobny sposób wyznacza się prawdopodobieństwo, że w kolejce pojazdów przejeżdżających linię zatrzymania w trakcie interwału G_p to k -ty pojazd zablokuje ruch kolejnych pojazdów:

$$p_k = u_{BL} \cdot u_p^{k-1} \quad \text{dla } k \leq n \quad (4)$$

Wykorzystując prawdopodobieństwo p_k , można wyznaczyć przeciętną liczbę pojazdów, jakie będą mogły przejechać przez linię zatrzymania w okresie G_p przy założeniu, że blokowanie relacji wystąpi:

$$n_{sr} = \frac{\sum_{k=1}^n (k-1) p_k}{\sum_{k=1}^n p_k} \quad [\text{P}] \quad (5)$$

Jednocześnie prawdopodobieństwo, że wystąpi blokowanie w grupie n pojazdów, wynosi:

$$1 - p_{bk} = 1 - u_p^n = \sum_{k=1}^n u_{BL} \cdot u_p^{k-1} \quad (6)$$

Natężenie nasycenia pasa ruchu sterowanego przez dwie grupy sygnałowe S_{2gr} można wyznaczyć jako ważony efekt dwóch przypadków:

- pełnej obsługi pojazdów w trakcie sygnału zielonego G (brak blokowania), która wystąpi z prawdopodobieństwem p_{bk} ;
- zredukowanej liczby obsługiwanych pojazdów z uwagi na wystąpienie blokowania relacji podstawowej w okresie G_p (co będzie mieć miejsce w $1-p_{bk}$ cyklach sygnalizacyjnych).

W pierwszym przypadku natężenie nasycenia wyznacza się ze wzoru (2). W drugim wynika ono z przeciętnej liczby pojazdów, jakie miną linię zatrzymania w okresie sygnału zielonego G_p (wzór 7) i liczby pojazdów obsługiwanych w interwale G_{Bl} . Zgodnie z przyjętą koncepcją formuła do wyznaczenia natężenia nasycenia będzie mieć ogólną postać:

$$S_{2gr} = \left([n_{sr}]^{[G]} + [S_j]^{[G]} \right) \cdot (1 - p_{bk}) + p_{bk} S_G \quad [\text{P/hz}] \quad (7)$$

przy czym $[x]^{[G]}$ oznacza transformację wartości natężenia na natężenie nasycenia przy założonej długości sygnału zielonego relacji podstawowej G .

Po podstawieniu do formuły (7) równań (2)-(6) i prostych przekształceniach powyższych wzorów oraz transponowaniu średniej liczby pojazdów na cykl na wartości godzinowe otrzymujemy postać równania określającego natężenie nasycenia pasa ruchu w warunkach blokowania jednej relacji przez drugą:

$$S_{2gr} = \frac{3600}{G_e} \sum_{k=1}^n [(k-1) \cdot u_{BL} \cdot u_p^{k-1}] + u_p^n \frac{G_p}{G} S_P + \frac{G_{Bl}}{G} S_j \quad [\text{P/hz}] \quad (8)$$

w którym oznaczenia są zgodne z poprzednimi wzorami, natomiast wartość n wyznacza się ze wzoru (1).

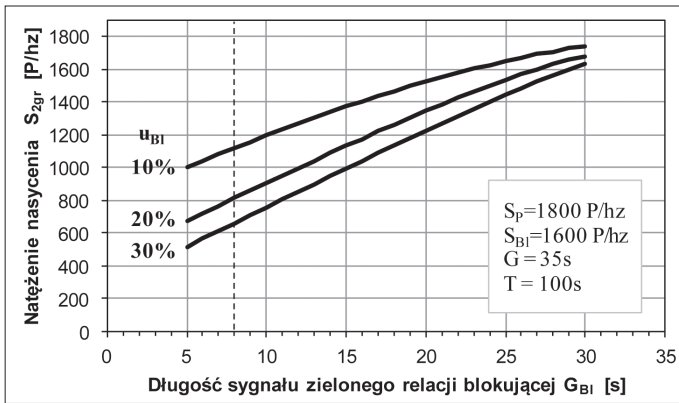
W zaprezentowanej formule natężenie nasycenia S_{2gr} wykorzystywane jest do wyznaczania przepustowości pasa ruchu na podstawie długości efektywnego sygnału zielonego dla grupy podstawowej:

$$C_j = S_{2gr} \cdot \frac{G_e}{T} \quad [\text{P/h}] \quad (9)$$

Poprawność wprowadzonych formuł zweryfikowano za pomocą programu do mikrosymulacji ruchu drogowego PTV Vissim [6]. Odwzorowano w nim przypadek obsługi dwóch relacji na jednym pasie ruchu otrzymujących sygnał zielony o różnej długości. Średni błąd względny wynosi 2.5%, co oznacza bardzo dobrą zgodność wypracowanych formuł z modelem symulacyjnym. Tak wysoka zbieżność nie jest przypadkowa, gdyż spora część założeń stanowiących podstawę do wyprowadzenia wzorów na natężenie nasycenia jest wykorzystywana w modelu symulacyjnym. Nieznaczące różnice wynikają z losowości procesu ruchu odwzorowywanego w modelu symulacyjnym, a także większej losowości zachowań kierujących w początkowym okresie sygnału zielonego, której nie odwzorowuje się w metodzie obliczeniowej [7]. Uzyskane wyniki wskazują, że obliczenia mogą z powodzeniem zastąpić metodę symulacyjną. Symulacja wskazała także na brak wpływu kolejności sygnałów na wartość natężenia nasycenia – tj., czy sygnał zielony dla relacji blokującej nadawany jest na początku sygnału zielonego relacji podstawowej, czy na jego końcu.

Wpływ wybranych czynników na natężenie nasycenia

Wyprowadzone zależności znajdujące odzwierciedlenie we wzorze (8) wskazują na czynniki wpływające na natężenie nasycenia pasa ruchu z dwiema relacjami obsługiwany niezależnie w cyklu. Są to: natężenie nasycenia poszczególnych relacji w warunkach braku blokowania, udział poszczególnych relacji na pasie oraz proporcje długości sygnałów zielonych dla obu z relacji. W celu zaprezentowania wpływu poszczególnych czynników na natężenie nasycenia pasa ruchu przyjęto przykładowe długości sygnału zielonego relacji podstawowej G , długości cyklu T oraz wartości natężeń nasycenia relacji podstawowej S_p i blokującej S_{Bl} (rys. 5 i 6).



Rys. 5. Wpływ długości sygnału zielonego relacji blokującej na natężenie nasycenia pasa ruchu

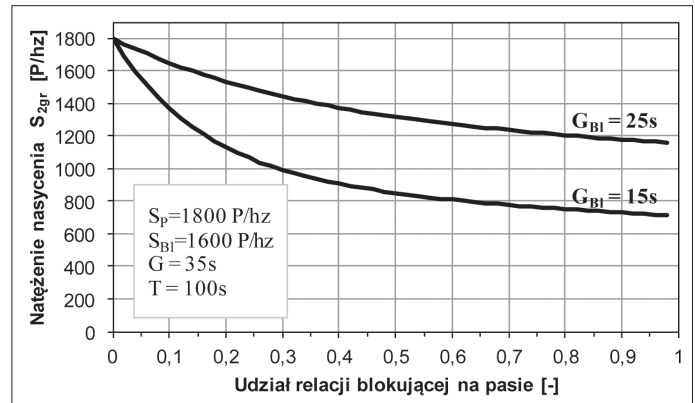
Wraz ze wzrostem udziału w ruchu na pasie grupy blokującej znacznie spada natężenie nasycenia pasa ruchu. Jako szacunkową wartość graniczną celowości zastosowania można przyjąć 25–30% udział relacji blokującej na pasie – powyżej tej wartości wzrost przepustowości ze względu na dopuszczenie przejazdu innej relacji jest niewielki. W takiej sytuacji korzystniejszym może być zastosowanie tradycyjnej organizacji ruchu i sterowania na wlocie.

Niezależne grupy sygnałowe w obliczeniowej grupie pasów

Przedstawiona powyżej metoda obliczeniowa dotyczy prostego przypadku jednego pasa ruchu na wlocie skrzyżowania. W praktyce stosowanie niezależnych grup sygnałowych ma miejsce zazwyczaj, gdy na wlocie występuje więcej pasów ruchu i tworzą one tzw. grupę obliczeniową. W MOP-SZS-04 pasy ruchu analizowane są łącznie, gdy pojazdy dowolnej relacji tworzą wspólne lub zależne od siebie kolejki pojazdów.

Metoda [5] do wyznaczenia rozkładu ruchu na pasy wykorzystuje założenie wyrównania stopni nasycenia (Q/S) poszczególnych pasów. Przyjmuje się, że straty czasu będą proporcjonalne do stopnia nasycenia, toteż kierujący, dążąc do ich minimalizacji, będą tak wybierać pas ruchu, by na żadnym z pasów warunki ruchu nie były wyraźnie gorsze niż na pozostałych. Założenie to, choć poprawne merytorycznie i wykorzystywane również w innych metodach obliczeniowych, np. [8], nie zawsze jest spełnione [9]. Liczba czynników determinujących zachowanie kierowców jest znaczna, bardzo trudna do skwantyfikowania i właściwie niemożliwa do ujęcia w modelach obliczeniowych, które choćby ze względów użytkowych nie powinny być na tyle skomplikowane, by ich zastosowanie wymagało dużego nakładu pracy lub pozyskiwania trudnodostępnych danych. Przykładowo, brak wyrównania stopni nasycenia może być wynikiem umiejscowienia skrzyżowania w sieci i wyboru przez kierujących takiego pasa ruchu, który umożliwi im przejazd w wybranej relacji na kolejnym skrzyżowaniu. Innym przykładem jest likwidacja jednego z pasów ruchu za skrzyżowaniem lub sama niechęć kierujących do zmiany pasa ruchu z uwagi na kłopotliwość wykonywania tego manewru i zagrożenie z nim związane.

W przypadku instalacji nad jednym z pasów ruchu sygnalizatorów przynależnych do różnych grup sygnałowych, rozkład ruchu na pasy dodatkowo się komplikuje. Przede wszystkim antycypacja przez kierowców czasu przejazdu



Rys. 6. Wpływ udziału relacji blokującej na pasie na natężenie nasycenia pasa ruchu dla przyjętych długości sygnałów zielonych i cyklu

wybrany pasem ruchu może być bardzo zróżnicowana, zwłaszcza w sytuacji występowania w potoku ruchu różnego udziału kierujących znających dane skrzyżowanie. Z uwagi na możliwość blokowania relacji podstawowej przez część okresu sygnału zielonego niepewnym jest także założenie o proporcjonalności strat czasu do wartości stopnia nasycenia. W rozkładzie ruchu na pasy w omawianym przypadku można rozważyć następujące możliwości:

- utrzymanie założenia o wyrównaniu stopni nasycenia na pasie;
- przyjęcie wartości stopnia nasycenia na pasie podstawowym (lub proporcji), powyżej którego kierujący zdecydują się korzystać z pasa obsługującego relację blokującą.

Sprawdzenie rozkładu ruchu na pasy wykonano, wykorzystując dane zbierane przez system sterowania ruchem, udostępnione przez Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie. W tym celu wybrano dwa wloty skrzyżowań cechujące się wysokim stopniem obciążenia – wlot T. Ptaszyckiego na skrzyżowaniu Jana Pawła II – Klasztorna – Bulwarowa – T. Ptaszyckiego w szczycie porannym oraz wlot ulicy Tischnera na skrzyżowaniu Tischnera – Wadowicka – Zakopiańska – Brożka. Natężenia nasycenia wyznaczono w oparciu o MOP-SZS-04 oraz zaproponowaną procedurę obliczeniową, przyjmując udział relacji skrętnych pasa blokującego ruch zgodnie z pozyskanymi danymi. Porównanie stopni nasycenia na pasie podstawowym y_I i pasie z relacją blokującą y_{II} przedstawiono na rysunku 7.

Na wlocie ulicy T. Ptaszyckiego możliwość wyboru pasa ruchu mieli poruszający się w relacji na wprost, natomiast relację blokującą stanowiła relacja w lewo, cechująca się niewielkim natężeniem ruchu (około 6% udział relacji na wlocie). Zauważono niską skłonność kierujących do wyboru pasa ruchu, który może być blokowany przez inną relację. Linia trendu pokazuje, że stopień nasycenia pasa blokowanego y_{II} stanowił około 60% wartości dla pasa podstawowego y_I . Kolejka na prawym pasie była znacznie dłuższa niż na pasie wewnętrznym, na którym relację na wprost mogła blokować relacja skrętna w lewo. Kierujący jadący na wprost przez skrzyżowanie zdecydowali się na wybór prawego pasa ruchu, gdy kolejka na pasie zewnętrznym zbli-

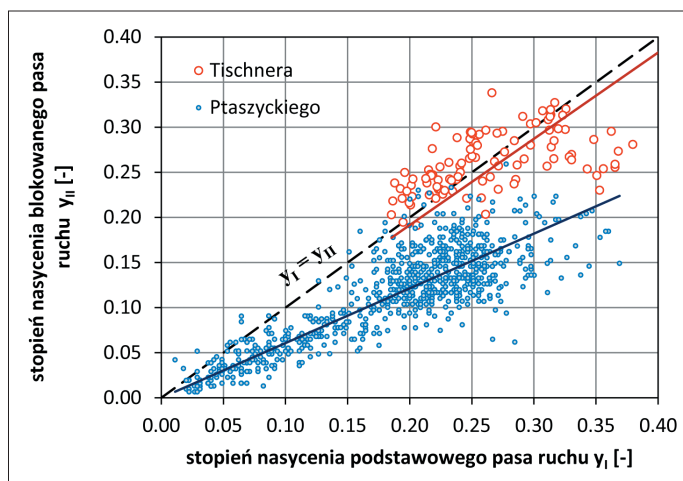
zała się do maksymalnej liczby pojazdów, jaka może być obsłużona w danym cyklu (wartość ta jest jednakże zmienna z uwagi na lokalizację skrzyżowania na ciągu objętym systemem dynamicznego sterowania ruchem).

Na wlocie ulicy Tischnera możliwość wyboru pasa ruchu obejmowała dwie relacje – w lewo oraz na wprost. Kierujący poruszający się na wprost lub w lewo mogli skorzystać z jednego z dwóch pasów ruchu w trzypasowej grupie pasów, przy czym relacją blokującą była relacja w lewo. Na potrzeby weryfikacji wpływu relacji blokującej na rozkład ruchu na pasy relacji, która może być blokowana na jednym z pasów ruchu, ograniczono analizę do dwóch pasów ruchu. Rozkład ruchu na pasy relacji na wprost zbliżony jest do modelowego. Kierujący zdecydowanie częściej decydowali się na przejazd na wprost z pasa z relacją blokującą. Wynika to prawdopodobnie z wyższego stopnia obciążenia wlotu oraz krótszego interwału blokowania relacji (G_p). Udział relacji w lewo na pasie wynosił przeciętnie 30%.

W świetle przeprowadzonych wstępnych obserwacji nie jest możliwe jednoznaczne wskazanie metody rozkładu ruchu na pasy. Na podstawie przedstawionych wyników można wstępnie przyjąć utrzymanie równomiernego rozkładu ruchu na pasy dla stopni obciążenia bliskich przepustowości oraz sygnałów zielonych relacji blokującej zbliżonych do sygnału zielonego dla relacji blokowanej, natomiast dla przypadku, w którym interwał G_p jest znacznie dłuższy niż G_{BP} , lepiej odwzorowuje ruch założenie wyższego stopnia obciążenia na pasie podstawowym.

Podsumowanie

Umieszczanie dwóch sygnalizatorów kierunkowych nad jednym pasem ruchu jest rozwiązaniem stosunkowo rzadko spotykanym. Doświadczenia z wdrożenia tego typu sposobu sterowania ruchem w Krakowie są na ogół pozytywne. Zastosowanie tego typu rozwiązania sygnalizacji na wlocie wynika głównie z potrzeby dostosowania się organizacji i sterowania ruchem do przekroju ulicy na dojeździe i wlocie skrzyżowania oraz zmiennej struktury kierunkowej przy jednoczesnych próbach zapewnienia możliwie najwyższego poziomu bezpieczeństwa ruchu.



Rys. 7. Rozkład ruchu na pasy z relacją blokującą reprezentowany przez stopnie nasycenia pasa

Analiza bezpieczeństwa ruchu na podstawie bazy SEWiK pozwala na stwierdzenie, że rozwiązanie to może być bezpiecznym, mimo występowania nieprzepisowych zachowań kierujących w obrębie wlotu skrzyżowania (zmiany pasa ruchu). Wiarygodna ocena bezpieczeństwa wymaga jednak dalszych badań i analiz obejmujących większą liczbę skrzyżowań oraz dłuższy okres obserwacji. Do oceny bezpieczeństwa przydatna może być teoria konfliktów ruchowych, a także ocena zachowań kierujących na wlotach skrzyżowań.

Przepustowość pasa ruchu sterowanego dwiema grupami sygnałowymi zależy głównie od udziału poszczególnych relacji na pasie oraz proporcji długości sygnałów zielonych poszczególnych grup. Opracowany prosty model obliczania przepustowości pasa ruchu dla omawianej organizacji ruchu na wlocie rozszerza metodę [5] o możliwość analizy tego typu rozwiązań. Wyznaczona wartość przepustowości może posłużyć do ustalenia stopnia obciążenia pasa ruchu, lecz nie powinna stanowić podstawy do obliczania miar oceny warunków ruchu (np. strat czasu), u których podstawy leżą założenia sprzeczne ze sposobem niezależnego wyświetlania sygnałów zielonych dla poszczególnych relacji korzystających z pasa ruchu.

Istotnym problemem jest przyjęcie algorytmu rozkładu ruchu na pasy wlotu wielopasowego w sytuacji występowania blokowania pojazdów jednej relacji przez drugą korzystającą ze wspólnego pasa ruchu. Przeprowadzone wstępne badania zachowań kierowców są zbyt ograniczone, by móc na ich podstawie określić rekomendowaną procedurę rozkładu ruchu na poszczególne pasy w grupie obliczeniowej. Mimo przedstawionych mankamentów, opracowane narzędzie umożliwi oszacowanie przepustowości po przyjęciu sposobu rozkładu ruchu na pasy i dzięki temu wstępną ocenę celowości zastosowania danej organizacji ruchu bez potrzeby wykorzystania bardziej skomplikowanych narzędzi.

Literatura

- Wytyczne Projektowania Skrzyżowań Drogowych, GDDP, Warszawa 2001.
- Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego – teoria i praktyka*, WKŁ, Warszawa 2008.
- Chodur J., Bąk R., *Spójność cech ruchu, skrzyżowania i sterowania jako determinanta jego sprawności*, „Logistyka”, 2014, nr 3 (na dysku CD).
- Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 roku 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 2003 r.
- Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, GDDKiA, Warszawa 2004.
- PTV AG, Vissim 5.10 User Manual. Karlsruhe 2008.
- Chodur J., Ostrowski K., *Charakterystyka strumienia ruchu w początkowym okresie sygnału zielonego na skrzyżowaniu z sygnalizacją*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2012, nr 5.
- Canadian Capacity Guide for Signalized Intersections, Institute of Transportation Engineers, Canada 2008.
- Chodur J., *Rozkład ruchu w grupie pasów na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2014, nr 11.