

Radosław Bąk

Politechnika Krakowska, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu

WPLYW WARUNKÓW PRZERYWANIA SYGNAŁU ZIELONEGO NA BEZPIECZEŃSTWO ZAMIEJSKICH SKRZYŻOWAŃ Z SYGNALIZACJĄ

Rękopis dostarczono, kwiecień 2013

Streszczenie: W artykule przedstawiono skutki zastosowania wybranych warunków logicznych przerywania sygnału zielonego dla skrzyżowań zamiejskich zlokalizowanych na drogach krajowych. Na podstawie przeprowadzonych badań na typowych skrzyżowaniach zamiejskich wykonano i skalibrowano model symulacyjny w programie Vissim. Wykorzystano go do oceny wpływu różnych warunków zakończenia sygnału zielonego na redukcję prawdopodobieństwa osiągnięcia maksymalnej dopuszczalnej długości sygnału zielonego i w konsekwencji poprawy bezpieczeństwa ruchu.

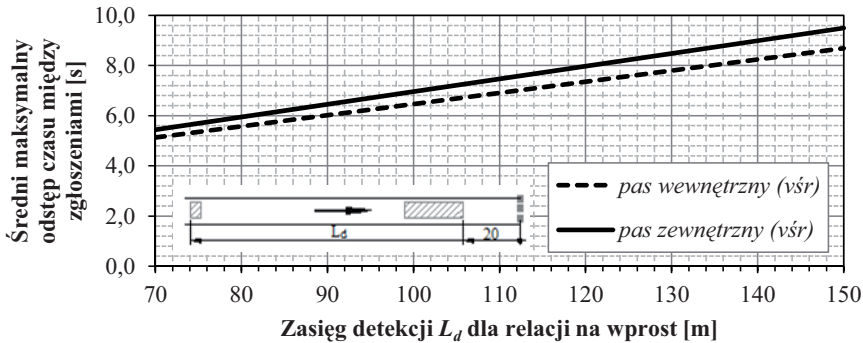
Słowa kluczowe: sterowanie ruchem drogowym, skrzyżowanie z sygnalizacją, strefa dylematu

1. WPROWADZENIE

Obecnie sterowanie ruchem na skrzyżowaniach realizowane jest niemal wyłącznie z wykorzystaniem sygnalizacji zmiennoczasowej – akomodacyjnej i acyklicznej. Najważniejszymi kryteriami sterowania ruchem – zwykle przeciwstawnymi – są bezpieczeństwo i sprawność ruchowa. Na skrzyżowaniach zamiejskich, na których, ze względu na wysokie prędkości potoku pojazdów, pojawia się problem strefy dylematu [6, 10], układ detekcji oraz logika sterowania powinny być w szczególności projektowane pod kątem zapewnienia możliwości bezpiecznego przejazdu przez skrzyżowanie. Między innymi dlatego stosuje się układy detekcji o większym zasięgu niż w rozwiązaniach miejskich, aby umożliwić podtrzymywanie sygnału zielonego przez pojazdy znajdujące się w większej odległości od linii zatrzymania. Najbardziej oddalone od linii zatrzymania detektory znajdują się ponad 100 m od niej. Przykładowo, strefa dylematu ustalona wg mniej rygorystycznego ujęcia kinematycznego [6] dla prędkości 90 km/h ($v_{dop} = 70$ km/h) jako limit prędkości powiększony o 20 km/h) rozciąga się od 75 m do 130 m.

Negatywnym skutkiem zwiększenia zasięgu detekcji jest wzrost łącznego czasu, o jaki wydłuża się sygnał zielony przez pojazdy zbliżające się do skrzyżowania (rys. 1). Oznacza

to, że rosnąca wartość minimalnego odstępu czasu między zgłoszeniami pojazdów prowadząca do przerwania sygnału zielonego zwiększa prawdopodobieństwo podtrzymania fazy aż do maksymalnej wartości G_{max} przewidzianej programem sygnalizacji. Zakończenie nadawania sygnału poprzez warunek osiągnięcia G_{max} oznacza, że w strefie dylematu znajdować się mogą pojazdy. Aby zminimalizować zagrożenie bezpieczeństwa ruchu z tym związane, można stosować dodatkowe warunki zakończenia sygnału oraz bardziej zaawansowane układy detekcji, które jednakże są stosunkowo rzadko spotykane w rozwiązaniach krajowych.



Rys. 1. Zależność średniego minimalnego odstępu między zgłoszeniami przerywającego sygnał zielony od zasięgu detekcji na pasach ruchu wlotu drogi krajowej na skrzyżowaniu zamiejskim

W artykule przedstawiono skutki wprowadzenia zmienionych warunków przerywania sygnału zielonego w końcowym okresie jego realizacji do klasycznych algorytmów sterowania akomodacyjnego. Analizie zostały poddane izolowane skrzyżowania zamiejskie, typowe w zakresie organizacji i sterowania ruchem, układu detekcji oraz charakterystyk ruchu [1, 3, 4]. Zaproponowano wprowadzenie interwału sygnału zielonego (tzw. „III interwał” [10]), którego podstawowym celem jest zwiększenie prawdopodobieństwa przerwania sygnału uwzględniającego obecność pojazdów w strefie dylematu. Jako warunki przerwania sygnału zielonego przyjęto trzy modyfikacje:

- (1) redukcję luk czasu przerywających sygnał zielony dla poszczególnych detektorów, dostosowanych do lokalizacji strefy dylematu i prędkości ruchu swobodnego po rozładowaniu kolejek na wlocie,
- (2) jak wyżej, jednakże z wprowadzeniem przełączania grupowego przy przejściu fazy do obsługi relacji skrajnych w lewo z drogi nadrzędnej,
- (3) wprowadzenie przerywania sygnału zielonego na podstawie analizy liczby pojazdów znajdujących się między dwoma wyróżnionymi przekrojami (detektorami).

Metoda (1) jest zbliżona do zasady działania do systemu GES [7]. Wolniej poruszające się pojazdy, które nie dotarły jeszcze do początku strefy dylematu, nie podtrzymują sygnału zielonego (czas przejazdu między detektorami jest dłuższy niż luka czasu przerywająca sygnał zielony). W wariantcie (2) dodatkowo założono, że w końcu III-go interwału sygnału zielonego grupy sygnałowe obsługujące ciąg drogi krajowej nie podtrzymują się wzajemnie, dzięki czemu przerwanie sygnału zielonego na obu wlotach

staje się niezależne od siebie. Wariant (3) zamiast analizy luk między pojazdami bierze pod uwagę liczbę pojazdów między dwoma detektorami – wejściowym i wyjściowym. Sposób ten jest zbliżony do elementów brytyjskiego systemu MOVA [8]. Sygnał zielony może być przerywany, jeśli liczba pojazdów w wyróżnionym obszarze jest mniejsza od założonej dopuszczalnej.

2. MODEL SYMULACYJNY SKRZYŻOWANIA

Ocena jakości funkcjonowania skrzyżowania z sygnalizacją oraz kwantyfikacja wpływu poszczególnych rozwiązań na warunki i bezpieczeństwo ruchu stanowią złożone zagadnienie badawcze. Empiryczno-analityczne modele szacowania przepustowości i warunków ruchu tylko w niewielkim stopniu uwzględniają pracę sygnalizacji w trybie akomodowanym. Wykonuje się oceny poszczególnych elementów programu sygnalizacji czy układu detekcji lub testuje złożone systemy sterowania wdrażane w całości.

Popularną metodą analizy funkcjonowania sygnalizacji zmiennoczasowej jest symulacja komputerowa. Możliwość mikrosymulacji ruchu na złożonych skrzyżowaniach z rozbudowanym i skomplikowanym algorytmem sterowania jest dużą zaletą, choć rzadko prowadzi do uogólnienia wyników, a procedury kalibracji niezbędne do budowy wiarygodnego modelu wymagają prowadzenia pomiarów wyróżnionych parametrów ruchu. Model symulacyjny skrzyżowania zamiejskiego zbudowany został w programie PTV Vissim [9] natomiast algorytm sterowania za pomocą aplikacji VisVAP. Ponieważ oprogramowanie nie posiada funkcji oceny bezpieczeństwa ruchu poprzez analizę trajektorii i zachowania pojazdów w sieci, przygotowano zewnętrzne rozszerzenie programu do prowadzenia analiz na podstawie pozyskanych z symulacji danych.

2.1. ZAŁOŻENIA DO MODELU

Model symulacyjny skrzyżowania przygotowano zgodnie z następującymi założeniami (rys. 2):

w zakresie geometrii i organizacji ruchu:

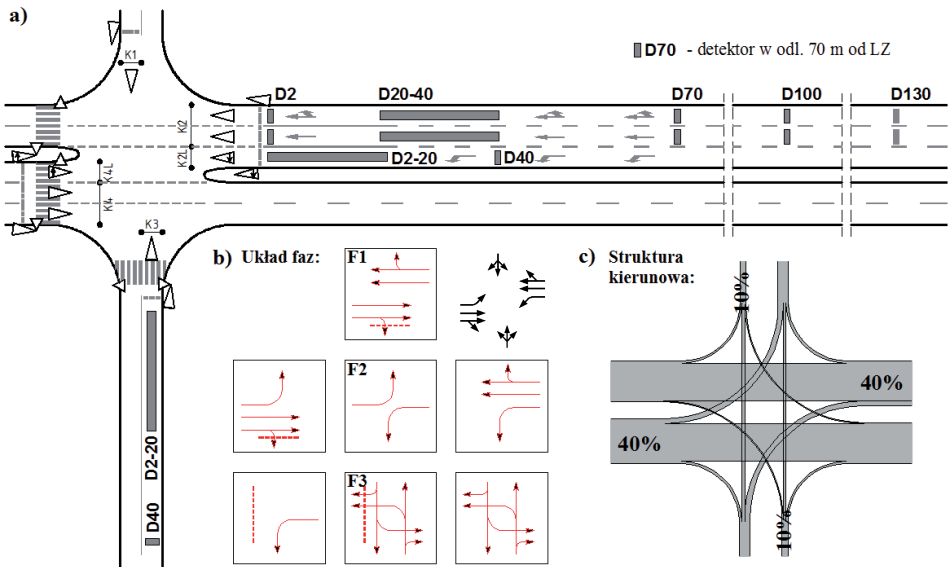
- symulowane skrzyżowanie czterowlotowe stanowi przecięcie dwóch dróg – o przekroju zasadniczym 2x2 (droga krajowa) i 1x2 (droga podporządkowana) z dodatkowymi pasami skrętu w lewo na drodze krajowej,
- przejścia dla pieszych zlokalizowane są na jednym wlocie drogi krajowej oraz jednym wlocie podporządkowanym,

w zakresie charakterystyk ruchu:

- przyjęto stałą strukturę kierunkową z 80% udziałem ruchu w ciągu drogi krajowej (relacja na wprost i w prawo z drogi głównej),
- zakres symulowanego natężenia ruchu na skrzyżowaniu wynosi $400 \div 4\,000$ P/h, natomiast ruch pieszy (20 Ps/h na każdym z przejść) jest stały,

- udział pojazdów ciężkich na kierunku głównym jest stały i wynosi 20% (70% pojazdów ciężarowych na pasie prawym oraz 30% na pasie lewym),
- rozkład prędkości pojazdów na kierunku głównym określony jest oddzielnie dla pasa zewnętrznego i wewnętrznego zgodnie z wyznaczoną dystrybuantą empiryczną reprezentującą przeciętną prędkość na skrzyżowaniach zamiejskich o wlotach wielopasowych [1, 4],
- natężenie nasycenia S na kierunku głównym wynosi $1\ 600 \div 1\ 700$ P/pas/hz [2, 4].

Kalibrację i weryfikację modelu przeprowadzono w oparciu o wyniki badań empirycznych charakterystyk potoku ruchu i funkcjonowania sygnalizacji świetlnej na drogach krajowych południowej i środkowej Polski [1, 4, 6], modyfikując parametry modelu ruchu jazdy za liderem oraz charakterystyki przyspieszenia i opóźnienia. Parametrami oceny zgodności modelu były rozkład ostępów pojazdów ruszających z kolejki (natężenie nasycenia) oraz rozkład prędkości potoku ruchu na wlocie po rozładowaniu kolejek. Weryfikację poprawności modelu stanowiły eksperymenty symulacyjne istniejących skrzyżowań z sygnalizacją świetlną objętych pomiarami, a następnie porównanie wybranych miar sterowania akomodacyjnego i wskaźników zagrożenia brd z danymi z pomiarów. Elementy weryfikacji przedstawiono w [2, 4].



Rys. 2. Skrzyżowanie przyjęte do analiz a) geometria tarczy i organizacja ruchu, b) schemat faz sygnalizacyjnych, c) diagram potoków ruchu

Wyjściowy algorytm sterowania, pozbawiony podziału sygnału zielonego na dodatkowe okresy pomiędzy G_{min} i G_{max} był punktem odniesienia dla późniejszych modyfikacji zasad zakończenia fazy obsługującej ciąg drogi krajowej. Założono podstawowe sterowanie trzyfazowe, dla którego w przypadku ciągłych wzbudzeń na detektorach realizowany jest układ faz w sekwencji: F1 w której występuje jednoczesna obsługa relacji na wprost

i w prawo w ciągu drogi krajowej, F2 – jako bezkolizyjna obsługa relacji w lewo z wlotów tej drogi i F3 – stanowiąca otwarcie wlotów bocznych i przejścia przez drogę krajową. Ponadto przyjęto:

- układ faz możliwych, obejmujących wszystkie przypadki kombinacji strumieni uzasadnionych zwiększeniem adaptacyjności pracy sygnalizacji (rys. 2),
- tryb pracy przy braku wzbudzeń z fazą preferowaną („zielone w ciągu drogi krajowej”),
- otwieranie przejścia przez drogę krajową jedynie po zgłoszeniu pieszego oraz pasywną obsługę przejścia dla pieszych przez wlot drogi podporządkowanej w fazie preferowanej,
- układ detekcji zgodnie z rys. 2 – dla pasów na wprost z drogi krajowej układ 5 detektorów o zasięgu 130 m (równy zasięgowi strefy dylematu I rodzaju dla prędkości $v_{70} + 20$ km/h) oraz 40 m dla pozostałych pasów ruchu,
- program sygnalizacji o długości cyklu 120 s wyrównujący stopień obciążenia w krytycznych grupach sygnałowych z zachowaniem preferencji dla kierunku głównego i uwzględnieniem potrzeb pieszych (maksymalne sygnały zielone dla faz F1, F2 i F3: 62/19/19 s).

2.2. MIARY SPRAWNOŚCI SKRZYŻOWANIA

Ocena funkcjonowania sygnalizacji na skrzyżowaniu wykonywana została w oparciu o zestaw miar opisujących warunki ruchu, a w przypadku bezpieczeństwa ruchu, poziom jego zagrożenia. W analizach dotyczących warunków ruchu najczęściej wykorzystuje się miary związane ze stratami czasu pojazdów, liczbą zatrzymań, rozkładem kolejek, prawdopodobieństwem obsługi pojazdu lub kryteriami ekologicznymi (zużycie paliwa, emisja zanieczyszczeń) oraz kryteria łączone.

Poziom bezpieczeństwa ruchu opisywany jest najczęściej przez wskaźniki wypadkowe [5]. Dla skrzyżowań z akomodowaną sygnalizacją świetlną wykorzystanie ich jest utrudnione, ponieważ czas potrzebny do zbierania danych z uwagi na stosunkowo niedużą liczbę wypadków jest zwykle dłuższy niż okres, który może być uznany za jednorodny pod względem stanu ruchu na skrzyżowaniu i sposobu sterowania. Ostatecznie określenie wpływu wyróżnionych cech sterowania na brd w oparciu o modele wypadkowe jest bardzo skomplikowane lub niejednokrotnie niemożliwe. Z tego względu do oceny zagrożenia bezpieczeństwa ruchu wykorzystuje się miary pośrednie, które same w sobie mogą stanowić kryterium optymalizacyjne i funkcję celu sterowania. W przeprowadzonych analizach wyróżniono mierniki oceny jakości funkcjonowania skrzyżowania, zestawione w tabl. 1.

Wskaźnik L_{SDI} oznacza sumaryczną liczbę pojazdów w ciągu godziny, jakie znalazły się w odległości od linii zatrzymania uniemożliwiającej bezpieczny przejazd (kontynuacja jazdy) lub zatrzymanie się w momencie zmiany sygnału zielonego na żółty [6]. Wskaźnik L_{SDII} jest rozszerzeniem strefy dylematu I rodzaju o obszar przed linią zatrzymania, w którym decyzje kierujących reagujących na zakończenie sygnału zielonego są nieprzewidywalne. Podejście takie jest spotykane głównie w literaturze zagranicznej [11]. Liczba wjazdów na skrzyżowanie w trakcie sygnału czerwonego jest skorelowana z liczbą

pojazdów w strefie dylematu (ok. 74% wjazdów) [6]. Wpływ na wartość wskaźników L_{SDI} i L_{SDII} ma wystawienie na ryzyko – natężenie ruchu i częstość przełączeń, która w przypadku sygnalizacji akomodacyjnej jest zależna od programu maksymalnego, stopnia obciążenia, układu detekcji, warunków zakończenia fazy oraz wyboru prędkości przez kierujących.

Tablica 1

Miary oceny bezpieczeństwa i warunków ruchu wykorzystane w analizie

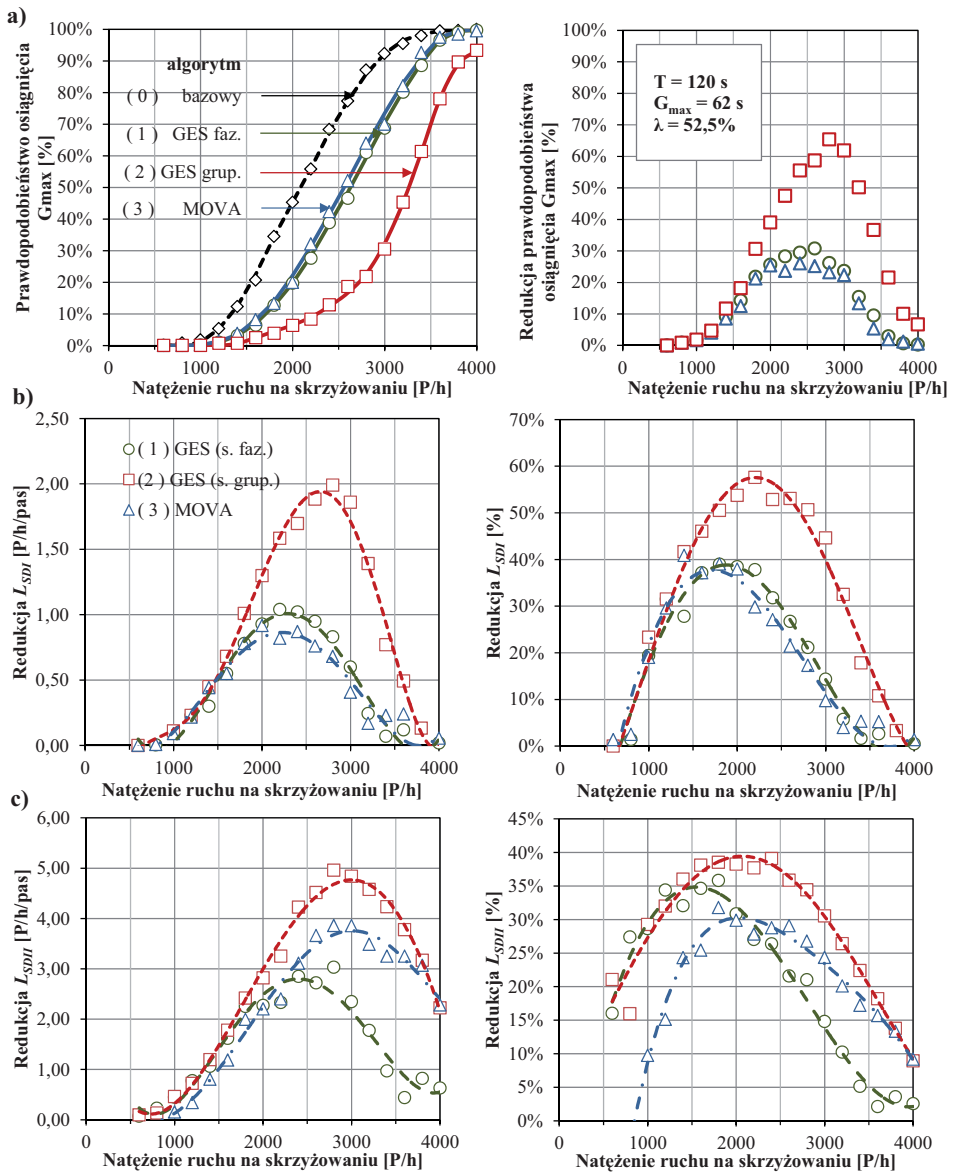
Ocena	Miernik	Znaczenie
Bezpieczeństwo ruchu	L_{SDI} [P/h/pas]	Liczba pojazdów w strefie dylematu I rodzaju
	L_{SDII} [P/h/pas]	Liczba pojazdów w strefie dylematu II rodzaju
Warunki ruchu	d_{sk} [s/P]	Średnia strata czasu na skrzyżowaniu
	σ_d [s/P]	Odchylenie standardowe strat czasu
	z [zat/P]	Wskaźnik zatrzymań

3. WPŁYW WARUNKÓW ZAKOŃCZENIA SYGNAŁU ZIEŁONEGO NA BRD I SPRAWNOŚĆ RUCHU

Ocenę wpływu wybranych warunków zakończenia sygnału zielonego 1 ÷ 3 przeprowadzono dla przyjętego programu sygnalizacji i układu detekcji, wypracowanych w ramach wcześniejszych analiz symulacyjnych [4]. Wprowadzone modyfikacje logiki sterowania dotyczyły wyłącznie warunków przerwania fazy F1. Pozostałe elementy algorytmu sterowania pozostały niezmiennie.

Długość III interwału (końcowego) dla fazy F1 przyjęto z przedziału 8 ÷ 12 s (są to wartości spotykane w praktyce projektowej). Dla wariantu (2) ponadto założono 6s interwał, w którym grupy sygnałowe relacji na wprost nie podtrzymują się wzajemnie. Symulacje prowadzono dla programu maksymalnego o długości cyklu $T = 120$ s.

Wyniki symulacji dla III interwału o długości 12 s przedstawiono w tabl. 2 oraz na rys. 3. Rysunek 3a przedstawia prawdopodobieństwo osiągnięcia maksimum sygnału zielonego w zależności od natężenia ruchu na skrzyżowaniu. Dla niezależnych przełączeń (3) udział ten wyznaczono jako średnią dla obu grup sygnałowych. Zastosowanie interwału kończącego sygnał zielony wyraźnie zmniejsza prawdopodobieństwo osiągnięcia G_{max} . Najlepsze efekty obserwowane są dla natężeń Q_{sk} 1500 ÷ 3000 P/h. Dla niewielkich natężeń ruchu do bezpiecznego zakończenia sygnału zielonego wystarcza standardowy algorytm, a dla wyższych stopni obciążenia, mimo redukcji sumarycznej luki dla detektorów, nie udaje się znaleźć momentu na przerwanie fazy. Rezygnacja z pasywnego podtrzymywania grup (2) pozwala na zmniejszenie liczby przełączeń przez G_{max} o ponad 60% (rys 3a). Konsekwencją wzrostu udziału przełączeń jest redukcja zagrożenia brd ocenianego poprzez liczbę pojazdów w strefie dylematu. Dla warunków (1) i (3) liczba pojazdów w strefie dylematu może być zredukowana o ok. 40%, co, mimo prostoty zastosowanych rozwiązań, wskazuje na wysoką ich efektywność (rys. 3b).



Rys. 3. Wpływ warunków przerywania sygnału zielonego na prawdopodobieństwo osiągnięcia G_{max} , (a), redukcję liczby pojazdów w strefie dylematu I rodzaju (b) i II rodzaju (c).

Liczba pojazdów w strefie dylematu II rodzaju (probabilistycznej) ulega zmniejszeniu, jednak w nie tak istotnym stopniu, jak dla ujęcia kinematycznego (L_{SDI}). Wynika to

głównie z ukierunkowania warunków przełączenia na eliminację sytuacji, w której przełączenie na sygnał żółty następuje w momencie, gdy pojazdy zbliżające się do skrzyżowania nie mogą się zatrzymać z akceptowalnym opóźnieniem. Redukcji wartości wskaźnika L_{SDII} sprzyjać mogą, także systemy kontroli prędkości oraz wjazdów na skrzyżowanie w trakcie sygnału zabraniającego – uwzględnią on bowiem kierujących niezależnie od przyczyny popełnianego wykroczenia (działania intencjonalnego lub błędu oceny sytuacji).

Tablica 2

Wpływ warunków przerywania sygnału zielonego na bezpieczeństwo ruchu

Q_{sk} [P/h]	1000	2000	3000	4000
Q_{gr} [P/h]	800	1600	2400	3200
X [-]	23%	47%	70%	95%
Średnia długość realizowanego cyklu T [s]				
(0) algorytm bazowy	64 -	95 -	115 -	119 -
(1) GES (s. fazowe)	64 0%	92 -3%	113 -2%	120 0%
(2) GES (s. grupowe)	62 -3%	87 -9%	110 -4%	120 0%
(3) MOVA	63 -1%	92 -3%	112 -3%	119 -1%
Prawdopodobieństwo osiągnięcia G_{max} [%]				
(0) algorytm bazowy	2% -	45% -	92% -	100% -
(1) GES (s. fazowe)	0% -92%	20% -57%	69% -26%	100% 0%
(2) GES (s. grupowe)	0% -100%	6% -86%	31% -67%	93% -7%
(3) MOVA	0% -91%	20% -56%	70% -24%	100% 0%
Liczba pojazdów w strefie dylematu I-go rodzaju [P/h/pas]				
(0) algorytm bazowy	0,5 -	2,4 -	4,3 -	4,1 -
(1) GES (s. fazowe)	0,4 -26%	1,5 -38%	3,6 -16%	3,8 -6%
(2) GES (s. grupowe)	0,4 -29%	1,1 -54%	2,4 -44%	4,1 0%
(3) MOVA	0,4 -25%	1,5 -38%	3,8 -12%	4,0 -1%
Liczba pojazdów w strefie dylematu II-go rodzaju [P/h/pas]				
(0) algorytm bazowy	1,6 -	7,4 -	15,8 -	24,9 -
(1) GES (s. fazowe)	1,1 -32%	5,1 -31%	13,6 -14%	23,5 -5%
(2) GES (s. grupowe)	1,3 -15%	4,8 -36%	11,2 -30%	22,6 -9%
(3) MOVA	1,4 -10%	5,2 -30%	11,6 -27%	19,7 -21%
Liczba wjazdów na skrzyżowanie podczas sygnału czerwonego [P/h/pas]				
(0) algorytm bazowy	0,5 0%	2,3 -	4,4 -	5,6 -
(1) GES (s. fazowe)	0,5 0%	1,4 -39%	3,5 -20%	5,3 -5%
(2) GES (s. grupowe)	0,5 0%	1,5 -35%	2,6 -41%	5,3 -5%
(3) MOVA	0,5 0%	1,6 -30%	2,9 -34%	5,3 -9%
Q_{sk} – natężenie ruchu na skrzyżowaniu, Q_{gr} – natężenie ruchu w grupach prowadzących relacje na wprost drogi krajowej, X – stopień obciążenia wyznaczony dla programu maksymalnego				

Liczba wjazdów pojazdów podczas sygnału czerwonego na skrzyżowanie ulega mniejszej redukcji niż liczba pojazdów w strefie dylematu (ok. 15% mniejsza przeciętna skuteczność). Wynika to ograniczonego wpływu warunków przełączania sygnału na

wjazdy intencjonalne, występujące głównie przy niskich prędkościach, mimo możliwości zatrzymania. Część pojazdów poruszających się z najwyższymi prędkościami (> 90 km/h) także została pominięta, gdyż ich uwzględnienie wymagałoby wydłużenia zasięgu detekcji.

Przedstawione powyżej wyniki analiz symulacyjnych dotyczą określonej struktury programu sygnalizacji i charakterystyk potoku ruchu. Przeanalizowano także wpływ prędkości na efekty stosowania modyfikacji warunków zakończenia fazy oraz długości cyklu i sygnałów zielonych. O ile wzrost prędkości powoduje zwiększenie liczby pojazdów rejestrowanych w strefie dylematu, to względna redukcja zagrożenia brd dla poszczególnych metod okazała się być zbliżona. Wpływ długości sygnałów jest bardziej złożony poprzez zależność natężenie ruchu – przepustowość, przy czym dla krótszych sygnałów zielonych względna redukcja liczby pojazdów w strefie dylematu jest wyższa (udział III interwału w sygnale zielonym jest większy).

Wpływ warunków przełączania na warunki ruchu pojazdów jest nieznaczny. Wprowadzenie III interwału sprzyja redukcji strat czasu – dla wariantu (1) przeciętnie o 2,3%, dla analizy liczby pojazdów między detektorami (3) o 3,5%. Dla niskich stopni wykorzystania przepustowości oraz dla bliskich jedności, warunki ruchu nie ulegają zmianom (test t-studenta wykazuje brak istotnych różnic dla $X < 0,3$ i $X > 0,8$). Redukcja strat czasu związana jest ze skróceniem okresu sygnału zielonego, w którym dopływ potoku pojazdów na drodze krajowej cechuje się niskim nasyceniem (równoważnym intensywności zgłoszeń). Przełączenia między grupami (2) prowadzą do nieznacznego wzrostu strat czasu. Związane jest to ze zmniejszeniem udziału sygnału zielonego w cyklu dla najbardziej obciążonych relacji na wprost przy jednoczesnej poprawie warunków ruchu relacji skrajnych w lewo.

4. PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Przedstawione analizy symulacyjne dla skrzyżowań zamiejskich z sygnalizacją wskazują, że przy wykorzystaniu prostych metod zmiany warunków kończenia fazy, uwzględniających występowanie strefy dylematu, możliwa jest istotna redukcja zagrożenia bezpieczeństwa ruchu. Najlepsze efekty w postaci redukcji liczby pojazdów w strefie dylematu oraz wjazdów na skrzyżowanie w trakcie sygnału czerwonego obserwuje się dla przeciętnych stopni obciążenia. Dla niskich natężeń ruchu korzyści z wprowadzenia III interwału są silnie zależne od długości sygnału zielonego. W sytuacji natężeń bliskich przepustowości modyfikacja warunków przełączania sygnału zielonego jest niewystarczającym narzędziem poprawy bezpieczeństwa ruchu.

Analiza porównawcza wybranych metod przerywania sygnału zielonego dla grup sygnałowych z dużym zasięgiem detekcji wskazuje na celowość stosowania przełączeń sygnałów dla grup, zamiast dla faz, bądź stosowania dynamicznych przejść międzyfazowych. Dla długich sygnałów zielonych i umiarkowanych stopni obciążenia grupy możliwa jest redukcja liczby pojazdów w strefie dylematu do ok. 55%.

W przypadku skrzyżowań zamiejskich pożądanym jest rozszerzenie zasad tworzenia algorytmu sterowania o warunki bezpiecznego zakończenia sygnału zielonego. Przedstawione w artykule wyniki analiz symulacyjnych wskazują na konieczność dalszego

poszukiwania rozwiązań optymalnego sterowania ruchem na skrzyżowaniach zamiejskich z uwzględnieniem bezpieczeństwa, zwłaszcza w zakresie powiązania parametrów sterowania i układów detekcji w aspekcie warunków przerywania sygnału zielonego dla potoków ruchu z wysokimi prędkościami. Kwantyfikacja skuteczności wybranych metod w redukcji zagrożenia poziomu bezpieczeństwa ruchu w zależności od charakterystyk ruchowych na skrzyżowaniu może być istotnym elementem oceny celowości stosowania zaawansowanych rozwiązań sterowania, w tym dostosowywania do warunków krajowych metod stosowanych powszechnie za granicą na drogach z wysokimi prędkościami ruchu. Uzasadnione jest prowadzenie dalszych analiz ukierunkowanych na poszukiwanie rozwiązań sprzyjających poprawie bezpieczeństwa z wykorzystaniem miar pośrednich.

Bibliografia

1. Bąk R., Chodur J.: Charakterystyki prędkości na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją. *Drogownictwo* 02/2012, s 48-54.
2. Bąk R.: Wpływ zasięgu detekcji na bezpieczeństwo ruchu na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. *Logistyka* 03/2012 s. 103-111 (na dysku CD).
3. Chodur J.: Charakterystyka natężeń ruchu na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją. *Technika Transportu Szynowego*, Nr 9/2012 s. 4629-4638 (na dysku CD).
4. Chodur J., 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 (praca niepublikowana).
5. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M.: *Inżynieria ruchu drogowego – teoria i praktyka*. Warszawa 2008.
6. Gondek S., Bąk R.: Badania wjazdów na sygnale czerwonym na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją. *Transport Miejski i Regionalny* 05/2012, s 18-24.
7. Klein L.A.: *Traffic Detector Handbook: Third Edition – Volume 1*. Federal Highway Administration Report FHWA-HRT-06-108, Washington, D.C. 2006.
8. Kronborg, P., Davidsson F.: MOVA and LHOVRA: Traffic Signal Control For Isolated Intersections. *Traffic Engineering and Control*, vol. 34, Nr 4/1993, s.193-200
9. Planung Transport Verkehr AG: *Vissim 5.30 User Manual*. Karlsruhe 2010.
10. Sylwestrzak W.: *Zasady projektowania sygnalizacji świetlnych na drogach pozamiejskich*. Inżynieria ruchu drogowego 3/2012, s. 34.
11. Urbanik T., Koonce P.: The dilemma with dilemma zones. *Proceedings of ITE District 6 Annual Meeting*, Portland 2007.

INFLUENCE OF GREEN TERMINATION CONDITIONS ON TRAFFIC SAFETY AT RURAL SIGNALIZED INTERSECTIONS

Summary: The paper presents effects of using a specific green termination interval on road safety at high speed intersections localized on national roads in Poland. On the basis of the research conducted at typical rural signalized intersections the simulation model has been developed and calibrated. PTV Vissim was used to evaluate how various green termination conditions may reduce max-out for high speed flows and therefore to improve road safety.

Keywords: signal control, signalized intersection, dilemma zone