

BAK Radosław<sup>1</sup>

## Wpływ zasięgu detekcji na bezpieczeństwo ruchu na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną

*bezpieczeństwo ruchu drogowego, sygnalizacja świetlna, skrzyżowanie zamiejskie, układ detekcji, strefa dylematu, mikrosymulacja ruchu*

### Streszczenie

*W referacie przedstawiono przegląd stosowanych rozwiązań w zakresie układu detekcji na zamiejskich skrzyżowaniach z wysokimi prędkościami. Na podstawie przeprowadzonych badań identyfikacyjnych funkcjonowania skrzyżowań zlokalizowanych na odcinkach dróg krajowych, zbudowano model symulacyjny w programie Vissim. Został on wykorzystany do określenia optymalnego zasięgu detekcji w celu poprawy bezpieczeństwa ruchu na skrzyżowaniu. Jako podstawowy miernik oceny bezpieczeństwa wykorzystano 'przeciętną liczbę pojazdów w strefie dylematu'. Wstępne wyniki analiz symulacyjnych wskazują na wyraźny wpływ obszaru detekcji na bezpieczeństwo ruchu. Zarówno zbyt krótki zasięg detekcji, jak i zbyt duży może prowadzić do pogorszenia brd.*

### THE INFLUENCE OF THE DETECTION RANGE ON TRAFFIC SAFETY ON RURAL SIGNALIZED INTERSECTIONS

#### Abstract

*The paper presents short review of the detector design on high speed rural signalized intersections. On the basis of the research conducted at rural signalized intersections the simulation model imitating its functioning has been developed in Vissim. Simulation model was used to determine optimal detection length to achieve higher traffic safety level. 'Average number of vehicles trapped in the dilemma zone' was used as the basic indirect safety measure. The preliminary results of the simulation show significant effects of the detection range on traffic safety. Too short detection as well as too long may have consequences in worsening traffic safety.*

#### 1. WPROWADZENIE

Sygnalizacja zmiennoczasowa stała się obecnie standardem w sterowaniu ruchem na skrzyżowaniach drogowych. Jej zastosowanie przynosi wymierne korzyści dla uczestników ruchu poprzez regulację ruchu adekwatną do aktualnego obciążenia. Jednym z efektów, obserwowanych głównie w przypadku występowania rezerwy przepustowości, jest poprawa warunków ruchu – redukcja strat czasu pojazdów czy liczby zatrzymań. Inne zalety sygnalizacji zmiennoczasowej dotyczą możliwości nadawania priorytetów w ruchu dla wybranych uczestników czy ograniczania zagrożenia bezpieczeństwa ruchu związanego bezpośrednio z funkcjonowaniem sygnalizacji świetlnej.

Problematyka dotycząca efektywności zmiennoczasowego sterowania ruchem jest i była obecna w działalności naukowo-badawczej i krajowej praktyce projektowej od wielu lat. Dotychczas zagadnienia związane z funkcjonowaniem sygnalizacji koncentrowały się głównie na obszarach miejskich, w których przede wszystkim sygnalizacja świetlna znajduje zastosowanie. Rozwój sieci dróg krajowych, nie zawsze nadążający za dynamicznym wzrostem natężeń ruchu, a także orientacja na poprawę bezpieczeństwa ruchu drogowego przyczyniły się do coraz powszechniejszego stosowania sygnalizacji na zamiejskich odcinkach dróg, a także podjęcia tematu jako jednego z wątków grantu badawczego [4].

Zamiejskie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną w porównaniu do rozwiązań miejskich cechują się przede wszystkim:

- wyższymi prędkościami potoku pojazdów (prędkość dopuszczalna  $v_{dop} = 70$  lub  $80$  km/h),
- wyższym udziałem w potoku ruchu pojazdów ciężkich (osiągającym 30%),
- dużą dysproporcją natężeń ruchu kierunku głównego i wlotów podporządkowanych,
- wystarczającą (na ogół) rezerwą przepustowości i akceptowalnymi warunkami ruchu.

Wynika stąd, że rozwiązania stosowane w warunkach miejskich nie muszą być optymalnymi dla terenu niezabudowanego. Szczególnie istotny jest problem prędkości na skrzyżowaniach zamiejskich [3], generujący specyficzne wymagania w zakresie organizacji i sterowania ruchem. Z drugiej strony struktura kierunkowa z unaoczniającą się wyraźną dominacją jednego ciągu oraz brak problemów ruchowych na skrzyżowaniu, umożliwiają szersze zastosowanie rozwiązań celujących w poprawę brd bez poważnych skutków w zakresie przepustowości. Uwzględnienie kryterium bezpieczeństwa ruchu w projektowaniu sygnalizacji świetlnej dotyczyć może ustalenia parametrów programu sygnalizacji zmiennoczasowej (długości sygnałów zielonych, cyklu, czasów międzyzielonych, warunków podtrzymania sygnału zielonego) oraz związanego z nimi zastosowanego systemu detekcji – zasięgu i układu detektorów

<sup>1</sup>Politechnika Krakowska, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków  
tel. +48 12 628-25-21, fax. +48 12 628-23-28, E-mail: rbak@pk.edu.pl

oraz pełnionych przez nich funkcji. Przykładem problemu ściśle związanego z bezpieczeństwem ruchu jest ochrona tzw. 'strefy dylematu'.

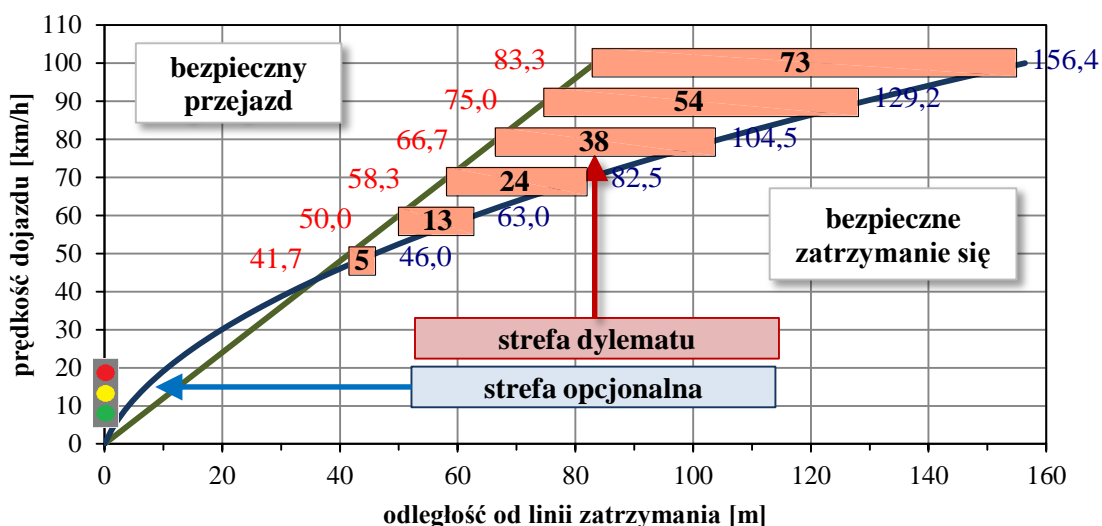
## 2. PROBLEM STREFY DYLEMATU

Problem strefy dylematu znany jest od lat 60. XX w i był przedmiotem wielu analiz, głównie zagranicznych oraz mniej licznych krajowych [4, 6, 7]. Związany jest on z niepewnością co do zachowania się kierujących zbliżających się do skrzyżowania w końcowym okresie trwania sygnału zielonego. Jeśli kierujący znajduje się w pewnej odległości od linii zatrzymania, zmiana sygnału zielonego na żółty oznaczać może zarówno brak możliwości bezpiecznego przejazdu przez skrzyżowanie (czas dojazdu do linii stop przekracza długość sygnału żółtego i skutkuje wjazdem na tarczę skrzyżowania, gdy nadawany jest już sygnał czerwony), jak i zatrzymania (pojazd znajduje się na tyle blisko linii zatrzymania, że hamowanie musi odbywać się z opóźnieniem uznawanym za niekomfortowe i niebezpieczne). Lokalizacja strefy dylematu zależy więc od długości sygnału żółtego, prędkości pojazdu, jego charakterystyk dynamicznych oraz cech psychofizycznych kierującego (czas reakcji). Wzrost prędkości pojazdu powoduje wydłużenie drogi hamowania, nieproporcjonalnie do odległości jaką może pokonać pojazd ze stałą prędkością.

Zasięg i położenie strefy dylematu można wyznaczyć w oparciu o model fizyczny ruchu pojazdu, dla założonych wartości parametrów. Standardowo przyjmuje się:

- długość sygnału żółtego  $t_z = 3$  [s] (wymagania przepisów krajowych [10])
- czas reakcji  $t_r = 1$  [s].
- graniczne opóźnienie uznawane za bezpieczne  $b = 3.0$  [m/s].

Wówczas lokalizacja strefy dylematu, którą przedstawiono na rys. 1, jest wyłącznie funkcją prędkości pojazdu. Dla standardowego limitu prędkości  $v_{dop} = 70$  [km/h] na drodze zamiejscowej strefa dylematu zaczyna się w 82,5 m od linii zatrzymania, a jej długość wynosi 24 m. Dla 90 km/h długość strefy dylematu wynosi już 54 m. Z tego względu na zamiejscowych skrzyżowaniach z sygnalizacją, na których prędkości są wysokie [3], korzystne i celowe byłoby wdrażanie środków ograniczających efekty występowania strefy dylematu. Prędkość pojazdów powinna być zatem parametrem wykorzystywanym również do wyznaczenia zasięgu strefy detekcji i lokalizacji detektorów.



Rys.1. Lokalizacja i długość strefy dylematu w zależności od prędkości pojazdów dojeżdżających do skrzyżowania

## 3. STREFA DYLEMATU JAKO CZYNNIK DETERMINUJĄCY STEROWANIE RUCHEM

### 3.1 Zagraniczne systemy sterowania ukierunkowane na poprawę bezpieczeństwa ruchu

Ograniczenie efektu strefy dylematu na skrzyżowaniu może być osiągnięte za pomocą różnych środków, które zazwyczaj dzieli się na bierne (statyczne, oddziałujące na zachowania kierowców) i czynne (dynamiczne – zależne od sytuacji ruchowej na skrzyżowaniu) [5, 7]. Dynamiczne metody eliminacji strefy dylematu są realizowane głównie poprzez zaawansowane systemy sterowania z dedykowanym układem detektorów na ich potrzeby. Przykładami tego typu systemów są: GES (Green Extension System), MOVA (Microscopic Optimised Vehicle Actuation), D-CS [1] czy szwedzki system LHOVRA i jego wersje rozwojowe (SOS) [8]. W systemach tych jednym z najistotniejszych zadań jest ograniczenie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu wynikającego z zakończenia sygnału zielonego i strefy dylematu. W tym celu stosowane są między innymi następujące metody:

- rozbudowane strategie podtrzymywania i przerywania sygnału zielonego,
- wydłużanie sygnału żółtego,
- wydłużanie czasu międzyzielonego,

Klasyczna strategia przerywania sygnału zielonego w wyniku osiągnięcia maksymalnej przyjętej długości sygnału zielonego  $G_{max}$  oraz dobór jednostkowych wydłużeń dla detektorów są odpowiednio modyfikowane. W systemie GES detektory rozmieszcza się tak, aby objąć nimi strefę dylematu wyznaczoną dla kwantyla 85% prędkości pojazdów.

W rozbudowanej wersji systemu bazującego na układzie kilku detektorów, za pomocą warunków przerywania sygnału potok pojazdów jest „filtrowany” w zależności od prędkości, tak by pojazdy poruszające się wolniej nie podtrzymywały sygnału zielonego zanim dojadą do obszaru strefy dylematu. Zwiększa to prawdopodobieństwo przerywania sygnału, poprzez warunek wystąpienia przerywającej sygnał luki na układzie detektorów, zamiast osiągnięcia maksimum sygnału zielonego  $G_{max}$ . Przerwanie sygnału zielonego poprzez osiągnięcie maksimum, następujące niezależnie od sytuacji ruchowej na wlotach skrzyżowania, staje się wówczas głównym generatorem sytuacji niebezpiecznych, toteż poszukiwano rozwiązania tego problemu poprzez implementację algorytmów optymalizujących wybór momentu zakończenia sygnału zielonego [1]. Przykładem może być system D-CS z zaimplementowanym algorytmem typu *rolling-horizon* [2], w którym funkcją celu jest minimalizacja liczby pojazdów w strefie dylematu. Procedura optymalizacyjna może także łączyć kwestie bezpieczeństwa z warunkami ruchu (brytyjski system MOVA, algorytm SOS).

Jednym z bardziej znanych systemów, kompleksowo ukierunkowanych na kwestie bezpieczeństwa, jest szwedzki system LHOVRA. Nazwa systemu stanowi akronim od pełnionych przez niego funkcji: L – wydłużenie sygnału zielonego dla pojazdów ciężkich, H – podstawowy priorytet drogowy, O – redukcja liczby wypadków, V – wydłużenie sygnału żółtego, R – kontrola długości sygnału czerwonego, A – „All red” (wszędzie czerwony). Realizacja wymienionych strategii wymaga odpowiedniego systemu detekcji o dużym zasięgu (detektorów o standardowych funkcjach od 140 do 180 m), wykrywania rodzaju pojazdów (priorytet dla pojazdów ciężarowych) oraz pomiaru prędkości zbliżających się do skrzyżowania (detektory strategiczne usytuowane ok. 300 m od skrzyżowania).

### 3.2 Przegląd rozwiązań krajowych

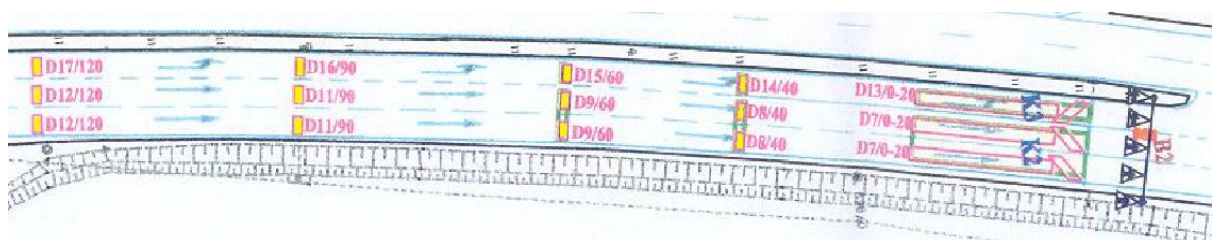
W krajowej praktyce projektowej nie został dotychczas wypracowany jeden sposób projektowania skrzyżowań zamiejskich z wysokimi prędkościami potoku pojazdów, pomimo często występujących podobieństw skrzyżowań na sieci dróg krajowych. Bardzo rzadko stosowane są systemy zachodnie, jak LHOVRA [8], a jeśli już ma to miejsce, to ich funkcjonalność jest ograniczona ze względu na wymagania formalne [10] (np. stała długość sygnału żółtego, sterowanie z fazą preferowaną na ciągu drogi krajowej) i wymagania praktyczne (stosowanie krótszych dopuszczalnych cykli maksymalnych). Nieliczne wdrożenia rozwiązań zagranicznych są jedną z przyczyn braku oceny ich efektywności i możliwości uwzględnienia specyfiki krajowej w praktyce projektowej. Z drugiej strony może to także świadczyć o niedocenieniu roli, jaką może pełnić dobrze zaprojektowany system sterowania zmiennoczasowego w ograniczaniu liczby wypadków i kolizji.

W logice sterowania problem strefy dylematu uwzględniany jest sporadycznie. Podstawowy parametr związany z układem detekcji, czyli jednostkowe przedłużenie sygnału (luka czasu na detektorze) stosunkowo rzadko jest wykorzystywany w zabezpieczeniu strefy dylematu dla różnych prędkości dojazdu do skrzyżowania. Jednym ze stosowanych rozwiązań jest anulowanie pasywnego podtrzymywania się grup sygnałowych w ciągu drogi krajowej w kilku ostatnich sekundach trwania sygnału zielonego. Jest to rozwiązanie powszechnie spotykane na drogach krajowych w województwie śląskim. Na bardziej rozbudowanych skrzyżowaniach spotykane są także detektory obejmujące tarczę skrzyżowania, pozwalające na opóźnienie przyznania sygnału zielonego w kolejnej fazie, jeśli po zakończeniu nadawania sygnału żółtego na tarczy skrzyżowania został wykryty pojazd.

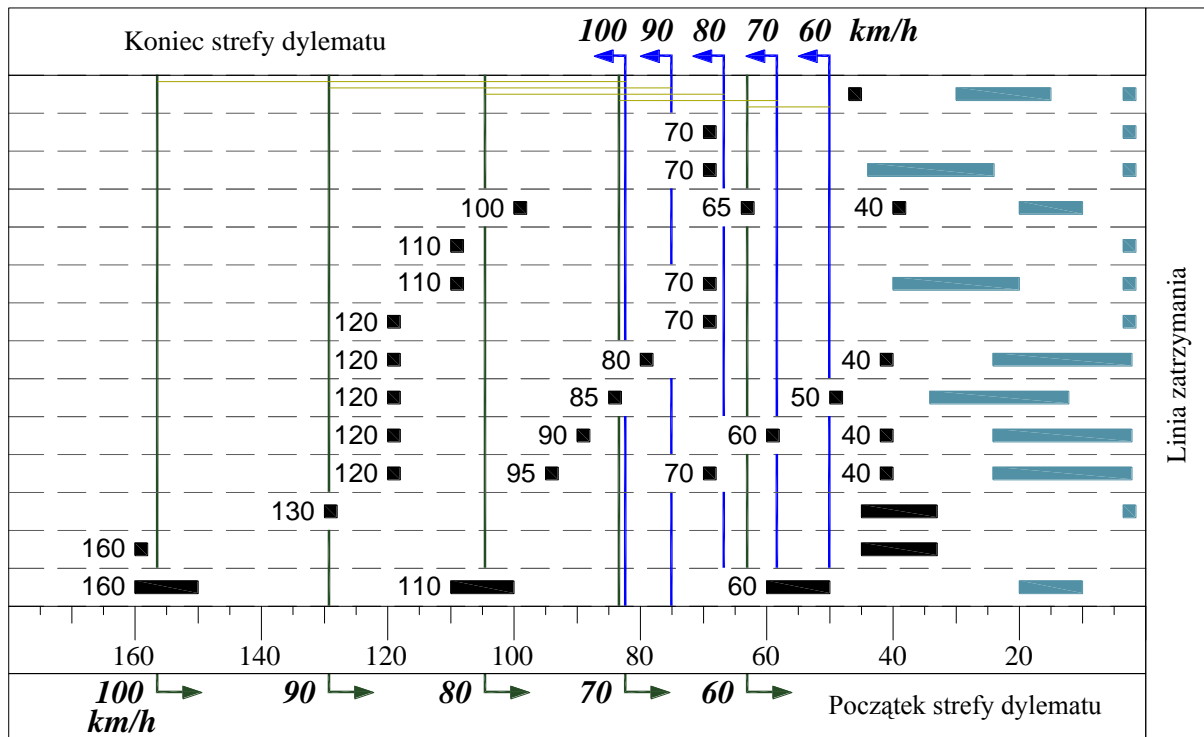
Na potrzeby sterowania zmiennoczasowego stosowane są różnorodne układy detektorów (zazwyczaj pętli indukcyjnych bądź wirtualnych pól detekcji). Ze względu na ochronę strefy dylematu istotnym elementem różnicującym jest zasięg detekcji oraz rozmieszczenie detektorów w obszarze występowania strefy dylematu. Przykładowe układy detektorów przyjęte dla pasa ruchu na wprost dla kierunku głównego ( $v_{dop} = 70$  km/h) przedstawiono na rys. 2 i 3. Można spróbować wyróżnić następujące typy ze względu na strefę detekcji oddaloną od linii zatrzymania:

- układ z jednym detektorem oddalonym od linii zatrzymania (50 ÷ 130m),
- układ z długą pętlą przejazdową oddaloną od linii zatrzymania w granicach 15 ÷ 30 m oraz krótką pętlą (lub wirtualnym polem detekcji) położoną w odległości 50 ÷ 80 m od linii zatrzymania,
- układ 2 ÷ 5 pętli (lub wirtualnych pól detekcji) rozmieszczonych w zbliżonych do siebie odstępach w przedziale od 40 m (50 m) do 160 m od linii zatrzymania.

Zwraca uwagę zasięg strefy detekcji, który waha się od 50 m do 160 m. Tak duże zróżnicowanie nie może wynikać jedynie ze specyfiki warunków lokalnych i związane jest bardziej z wypracowanymi w danym oddziale GDDKiA wymaganiami. Niektóre z układów detekcji stanowią przeniesienie rozwiązań spotykanych powszechnie w warunkach miejskich i nie uwzględniają problemu wysokiej prędkości potoku pojazdów dojeżdżających do skrzyżowania. Rysunek 3 pozwala porównać lokalizację detektorów z zasięgiem strefy dylematu wyznaczonej z modelu fizycznego. Część z zastosowanych rozwiązań wyraźnie pomija aspekt prędkości pojazdów na wlocie, nie obejmując swoim zasięgiem strefy dylematu dla prędkości dopuszczalnej. W takiej sytuacji wdrożenie logiki sterowania uwzględniającej zagrożenie bezpieczeństwa ruchu wynikające z przełączeń sygnałów nie jest praktycznie możliwe.



Rys.2. Przykładowy układ detektorów o zasięgu 120m stosowany w województwie śląskim.



Rys.3. Wybrane układy detektorów spotykane na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na drogach krajowych

#### 4. WPLYW ZASIĘGU DETEKCJI NA BEZPIECZEŃSTWO RUCHU

Duży zbiór stosowanych układów detekcji na drogach krajowych wskazuje na potrzebę oceny różnych rozwiązań i wypracowania kryteriów stosowania poszczególnych układów detekcji w zależności od wyróżnionych charakterystyk ruchowych i parametrów sterowania. Liczba czynników, które mogą decydować o wyborze układu detektorów i parametrowi z nimi związanych jest znaczna, a ich wpływ na brd nie może być rozpatrywany jako zmiennych niezależnych. Podstawowymi czynnikami są: natężenia ruchu pojazdów, prędkość potoku pojazdów, program sygnalizacji świetlnej. Przeanalizowanie wszystkich możliwych kombinacji i zależności wymagałoby szeregu badań identyfikacyjnych i przeprowadzenia obszernych analiz, toteż, ze względu na pilotażowy charakter analiz, zdecydowano się na przyjęcie ustalonych (stałych) parametrów sterowania i charakterystyk ruchowych uzyskanych z pomiarów. Przedmiotem zainteresowania był wpływ zasięgu strefy detekcji na bezpieczeństwo ruchu na zamiejskim skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną. Złożoność zagadnienia sugerowała wybór symulacji komputerowej (mikrosymulacji ruchu) jako narzędzia badawczego.

##### 4.1 Założenia przyjęte do symulacji funkcjonowania skrzyżowania

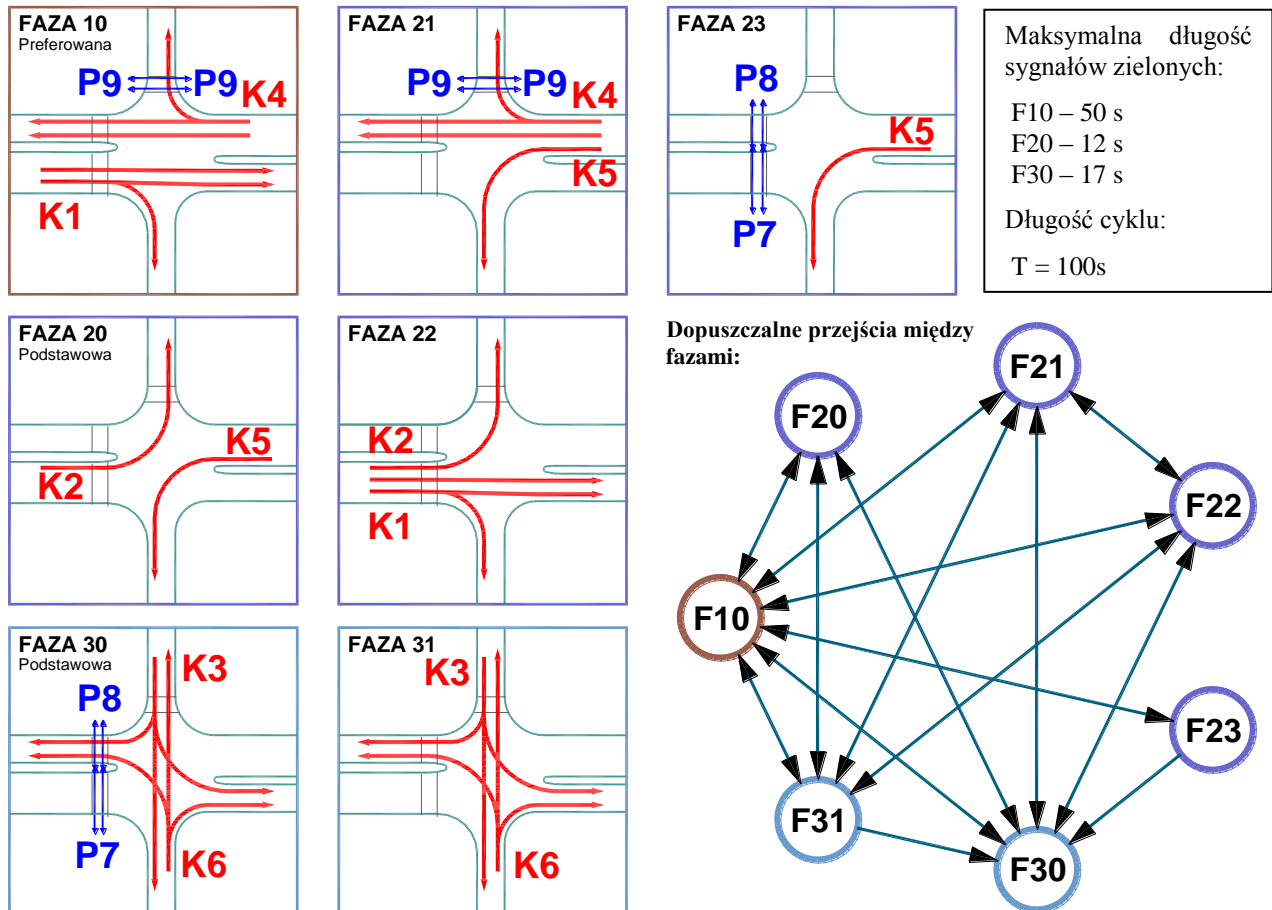
Niewielka liczba zidentyfikowanych rozwiązań ukierunkowanych na ochronę strefy dylematu w stosowanych algorytmach sterowania oraz powtarzalność cech wyróżniających skrzyżowania zamiejskie w zakresie geometrii, organizacji i sterowania ruchem były przesłanką do zaproponowania modelowego skrzyżowania, dla którego przeprowadzono analizy symulacyjne.

Na podstawie analizy stosowanych rozwiązań, przyjęto następujące założenia do modelu symulacyjnego:

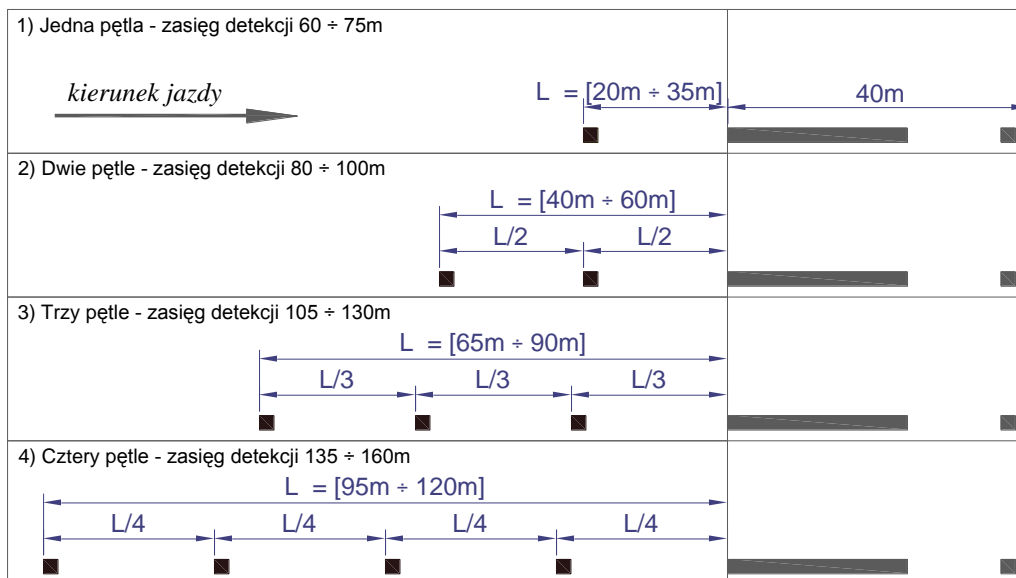
- droga krajowa jest wielopasowa o przekroju 2 x 2 na dojeździe do skrzyżowania, wloty boczne stanowi droga jednojezdniowa,
- skrzyżowanie ma cztery wloty, przy czym na wlotach drogi krajowej występują dodatkowe pasy ruchu do skrętu w lewo, wloty boczne są jednopasowe (brak poszerzenia wlotu),
- przejście dla pieszych przez drogę krajową wyznaczono tylko na jednym z wlotów,
- łączne natężenia ruchu na pasach ruchu objętych ochroną strefy dylematu wynoszą 1800 P/h,
- łączne natężenia ruchu dla grup obsługiwanych poza strumieniami poruszającymi się z wysoką prędkością, objętych ochroną strefy dylematu wynosi 500 P/h: 250 P/h w fazie 20 (rys. 4) dla relacji skrętnych w lewo z drogi głównej oraz 250 P/h w fazie 30 (rys. 4) z wlotów podporządkowanych,
- ruch pieszy przecinający drogę krajową jest sporadyczny (20 Ps/h),
- rozkład prędkości w ruchu swobodnym potoku pojazdów osobowych i ciężarowych uzyskany z badań empirycznych [3, 4] opisany jest rozkładem normalnym uciętym o parametrach  $v_{sr1} = 70$  km/h,  $\sigma_1 = 17$  (przeciętne wartości) oraz  $v_{sr2} = 85$  km/h,  $\sigma_1 = 14$  km/h (skrzyżowania cechujące się najwyższymi obserwowanymi prędkościami pojazdów),

- sygnalizacja funkcjonuje jako trójfazowa w podstawowym układzie sterowania, przy czym możliwa jest realizacja faz zależnych od zgłoszeń (rys. 4) a także zmiana kolejności faz w celu obsługi wszystkich strumieni w cyklu,
- w przypadku braku zgłoszeń realizowana jest strategia z fazą preferowaną obsługującą ciąg drogi krajowej (wg zarządzenia GDDKiA),
- układ detektorów składa się z pętli obecności usytuowanej 2 m od linii zatrzymania, długiej pętli przejazdowej zlokalizowanej w odległości od 15 do 40 m oraz pętli krótkich usytuowanych zgodnie z rys. 5 z warunkiem przerwania pozwalającym na przejazd pojazdu między detektorami z prędkością równą 48 km/h (kwantyf 15% wyznaczony z badań empirycznych) po rozładowaniu kolejki.

Dla przyjętych powyżej założeń wykonano model skrzyżowania w programie Vissim [9] oraz logikę sterowania akomodacyjnego (program VisVAP). W celach porównawczych symulowano także sygnalizację stałoczasową, której program sygnalizacji odpowiadał programowi maksymalnemu sygnalizacji akomodacyjnej. Wykonano kilkukrotnie przebiegi symulacyjne dla dwóch profili prędkości w ruchu swobodnym.



Rys.4. Układ faz podstawowych i możliwych oraz dopuszczalnych przejść między fazami



Rys.5. Rozmieszczenie detektorów w obszarze strefy dylematu dla określonej długości strefy detekcji.

#### 4.2 Weryfikacja wyników symulacji

Przeprowadzone liczne badania empiryczne zachowań kierujących na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną na drogach krajowych województw śląskiego, małopolskiego i łódzkiego pozwoliły na weryfikację modelu symulacyjnego. Weryfikacja polegała na implementacji w programie Vissim wybranych skrzyżowań zgodnie z otrzymanymi z pomiarów, bądź projektów sygnalizacji danymi w zakresie:

- natężeń ruchu (w tym struktury rodzajowej i kierunkowej),
- prędkości potoku pojazdów,
- układu detekcji.

Parametrem wykorzystanym do oceny zgodności z wynikami badań była liczba pojazdów, która znalazła się w strefie dylematu (SD) w trakcie zmiany sygnału zielonego na żółty dla drogi krajowej. W tablicy 1 zestawiono podstawowe dane dotyczące wybranych poligonów oraz porównanie wyników symulacji z pomiarami.

Tab. 1. Porównanie wyników symulacji z pomiarami

Skrzyżowanie		$Q_{sk}$ [P/h]	$v_{sr}$ [km/h]	$T_{max}$ [s]	Zasięg detekcji [m]	Liczba pojazdów w SD [P/h/pas]		
						Pomiar	Symulacja	Różnica
1	DK1 Brudzowice	2500	81	120	120	5,7	4,6	1,1
2	DK 94 Bolesław	1450	71	120	80	4,0	2,4	1,6
3	DK 94 Sławków	1630	80	120	160	4,7	4,0	0,7

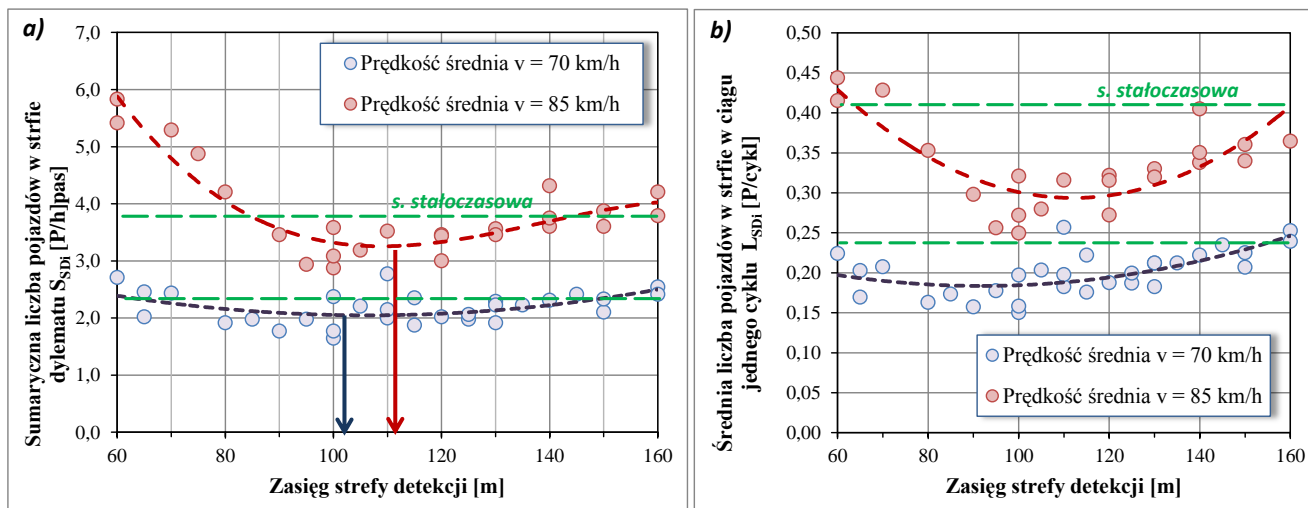
Dla dwóch z trzech symulowanych skrzyżowań, liczba pojazdów w strefie dylematu okazała się być bliska otrzymanej z pomiarów (różnica ok. 1 pojazd), jednakże symulacja zaniża wyniki w stosunku do obserwacji. Może być to tłumaczone większym udziałem odstępów niebezpiecznych występujących na skrzyżowaniu (odstępów niebezpiecznych nie były kalibrowane w programie), a także częściowo zawodnością funkcjonowania akomodacji w warunkach rzeczywistych. W szczególności dotyczyło to skrzyżowania w Bolesławiu, na którym zastosowano wideodetektory – w trakcie pomiarów zaobserwowano przełączenia, które nie powinny mieć miejsca według projektu sygnalizacji.

#### 4.3 Analiza wyników symulacji

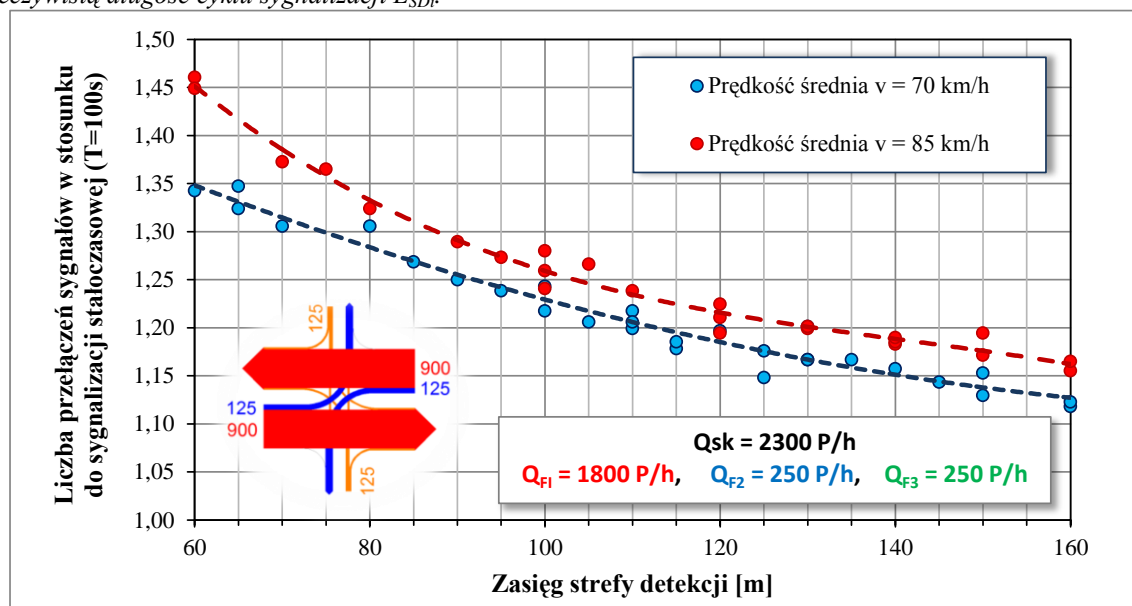
Zabezpieczenie strefy dylematu związane jest przede wszystkim z takim podtrzymywaniem sygnału zielonego w grupach sygnałowych, aby w momencie przełączenia sygnału pojazdy znajdowały się poza nią. Ponieważ zastosowanie miar bezpośrednio świadczących o zagrożeniu bezpieczeństwa (konflikty ruchowe, wjazdy na sygnale czerwonym) jest w zastosowanym środowisku symulacji komputerowej stosunkowo skomplikowane i wymaga badań identyfikacyjnych związanych bezpośrednio z probabilistycznym opisem zachowań kierujących (aspekt psychofizyczny oraz decyzyjny), do oceny zagrożenia wykorzystano miary pośrednie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu:

- $S_{SDi}$  - sumaryczną liczbę pojazdów znajdujących się w strefie dylematu z uwzględnieniem rzeczywistej prędkości pojazdów [P/h/pas]
- $L_{SDi}$  - przeciętną liczbę pojazdów w strefie dylematu w przeliczeniu na 1 zmianę sygnału zielonego na żółty wyznaczoną z uwzględnieniem rzeczywistej prędkości poruszających się pojazdów [P/cykl/pas]

Wskaźnik  $L_{SDi}$  określa zagrożenie w cyklu, natomiast  $S_{SDi}$  pozwala uwzględnić częstość przełączeń sygnałów dla analizowanej grupy pasów. Na rysunku 6 przedstawiono wyniki symulacji dla zdefiniowanych wskaźników  $S_{SDi}$  (rys. 6a) i  $L_{SDi}$  (rys. 6b) w zależności od zasięgu strefy detekcji.



Rys.6. Wpływ zasięgu strefy detekcji na liczbę pojazdów w strefie dylematu a) w ciągu 1 godziny  $S_{SDi}$ , b) w przeliczeniu na rzeczywistą długość cyklu sygnalizacji  $L_{SDi}$ .



Rys.7. Liczba zmian sygnału zielonego na żółty dla ustalonych natężeń ruchu w fazach sygnalizacyjnych (1800 / 250 / 250 P/h) w zależności od długości strefy detekcji dla programu maksymalnego o  $T = 100$  s.

Dla obu przyjętych rozkładów prędkości można znaleźć zasięg detekcji minimalizujący liczbę pojazdów w strefie dylematu. Dla  $v_{sr1} = 70$  km/h wynosi on nieco ponad 100 m, a dla  $v_{sr2} = 85$  km/h wzrasta do 112 m, przy czym dla wyższych prędkości na wlocie wpływ długości strefy detekcji jest bardziej wyraźny. Dla niewielkiego zasięgu detektorów, nieobjętego strefy dylematu następuje istotne pogorszenie bezpieczeństwa ruchu, nawet w stosunku do sygnalizacji stałoczasowej. Wynika to ze zwiększonej liczby przełączeń sygnału zielonego na żółty i czerwony w ciągu godziny o 35 – 45% (rys. 7), wzrasta więc wystawienie na ryzyko związane z pracą sygnalizacji. W sytuacji, gdy w innej fazie zgłoszone zostało zapotrzebowanie na przejazd bądź przejście, a w zasięgu detekcji nie został wykryty pojazd, sygnał zielony jest kończony, ponieważ pojazdy znajdujące się nieco dalej od linii zatrzymania (w tym znajdujące się w strefie dylematu) nie wpływają na działanie sygnalizacji. Wraz z wydłużeniem strefy detekcji rejestrowana liczba pojazdów w strefie dylematu maleje, aż do momentu, gdy objęta nią zostanie większość z poruszających się pojazdów. Dalsze wydłużenie zasięgu detekcji powoduje ponowny wzrost rejestrowanej liczby pojazdów w strefie dylematu. Zwiększenie zasięgu detektorów oznacza wydłużenie czasu podtrzymania sygnału umożliwiającego pojazdowi dojazd do linii zatrzymania, a więc i osiągnięcie maksimum czasu trwania sygnału zielonego  $G_{max}$  dla fazy (maksymalnego dopuszczalnego czasu oczekiwania na obsługę w pozostałych grupach), czyli sytuacji, w której przełączenie sygnału następuje niezależnie od lokalizacji i prędkości pojazdów na dojeździe do skrzyżowania. Oznacza to, że rozbudowa układu detekcji ze względów bezpieczeństwa ruchu ponad ok. 100 – 120 m nie jest zasadna, jeśli nie będzie powiązana z doбором jednostkowego wydłużenia sygnału zielonego dla najdalej odsuniętych od linii zatrzymania detektorów uwzględniających wyższe prędkości.

Dla bardzo dużego zasięgu strefy detekcji ( $> 150$ m), funkcjonowanie sygnalizacji w trybie stałoczasowym daje lepsze efekty ze względu na liczbę pojazdów w strefie dylematu (rys.6). Wynika to ze skrócenia cyklu maksymalnego

sygnalizacji zmiennoczasowej ze względu na krótszy czas obsługi wlotów bocznych oraz relacji skrzyżnych z drogi głównej (dostosowanie długości sygnałów do natężeń ruchu, brak obsługi ruchu pieszego, jeśli nie ma takiej potrzeby).

Należy zaznaczyć, że przedstawione analizy dotyczą określonych natężeń ruchu ( $Q_{sk} = 2300$  P/h) i parametrów programu maksymalnego ( $G_{max} = 50$  s,  $T = 100$  s). Wzrost długości sygnału zielonego dla strumieni, których prędkości wymagają zastosowania środków redukujących efekt strefy dylematu przyczynia się do redukcji liczby pojazdów w strefie dylematu w ciągu godziny jak i w przeliczeniu na cykl sygnalizacji świetlnej, dzięki zmniejszeniu prawdopodobieństwa osiągnięcia maksimum sygnału zielonego.

## 5. WNIOSKI KOŃCOWE

Czynnik bezpieczeństwa ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną z wysokimi prędkościami powinien być istotną determinantą projektowania programu sygnalizacji świetlnej i układu detekcji. Rozwiązania zagraniczne wskazują na znaczną rolę systemu sterowania w redukcji zagrożenia związanego z zakończeniem sygnału zielonego na drodze, na której prędkość potoku pojazdów powoduje pojawienie się tzw. strefy dylematu. Ochrona strefy dylematu jest jednym z podstawowych kryteriów rozmieszczenia detektorów, ustalenia pełnionych przez nich funkcji oraz algorytmu sterowania.

W warunkach krajowych problem strefy dylematu na skrzyżowaniach zamiejskich pozostaje niedoceniony. Przegląd stosowanych rozwiązań wskazuje na nieliczne wdrożenia systemów uwzględniających problem wysokich prędkości na skrzyżowaniach zamiejskich. Stosowane układy detektorów są bardzo zróżnicowane, a jedną z podstawowych cech specyfikujących zastosowane rozwiązanie jest zasięg strefy detekcji obejmujący pasy ruchu na wprost wlotu drogi krajowej. Waha się on od 50 do 160 m (jeśli pominać kilka adaptacji systemów typu LHOVRA w warunkach krajowych), a sygnalizacja pracuje najczęściej jako klasyczna akomodacyjna.

Szczególną rolę przy redukcji liczby wjazdów na sygnale czerwonym i konfliktów związanych z hamowaniem przy zmianie sygnału zielonego na żółty odgrywa zastosowany układ detekcji na wlotach skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. W przypadku, gdy dla najdalej usytuowanych detektorów nie są stosowane jednostkowe wydłużenia podtrzymujące sygnał zielony tylko dla pojazdów poruszających się z wyższymi prędkościami, o efektywności sterowania akomodacyjnego decyduje zasięg strefy detekcji. Miarą zagrożenia bezpieczeństwa ruchu, a także jednym z kryteriów optymalizacyjnych doboru momentu zakończenia sygnału zielonego może być liczba pojazdów w strefie dylematu.

Symulacja komputerowa jest bardzo przydatnym narzędziem dla inżyniera ruchu. Określając miary pośrednie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu, można ją wykorzystać do ilościowej oceny bezpieczeństwa ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Przeprowadzone analizy symulacyjne dla klasycznych rozwiązań sygnalizacji akomodacyjnej w warunkach krajowych wskazują że:

- liczba pojazdów w strefie dylematu może być wykorzystana jako jedna z miar pośrednich w ocenie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu wynikającego z funkcjonowania sygnalizacji świetlnej,
- optymalna długość strefy detekcji dla prędkości rejestrowanych na skrzyżowaniach zamiejskich wynosi ok. 100 – 120 m od linii zatrzymania,
- dobór układu detektorów jest tym bardziej istotny, im prędkości potoku pojazdów są większe,
- wydłużanie strefy detekcji w celu objęcia nią strefy dylematu pojazdów poruszających się z największymi prędkościami (ponad 90 km/h) nie musi być zasadne; dla przyjętych parametrów sterowania i natężeń ruchu najmniejsza liczba pojazdów w strefie dylematu osiąga wartość minimalną, gdy strefa detekcji wyznaczona jest dla kwantyla 70% prędkości pojazdów na wlocie skrzyżowania.

Istnieje potrzeba prowadzenia dalszych analiz związanych z rozwojem metod podnoszących bezpieczeństwo ruchu na skrzyżowaniach zamiejskich z sygnalizacją świetlną. Szczególnie przydatne byłoby powiązanie układu detekcji z natężeniami ruchu i parametrami programu sygnalizacji świetlnej w celu ograniczenia efektu strefy dylematu.

## 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Bonneron J., Middelton D., Zimmerman K., Charara H., Abbas M.: *Intelligent Detection-Control System for rural signalized intersections*, Texas Transportation Institute, 08. 2002
- [2] Bonneson, J. A., McCoy, P. T. . *Manual of Traffic Detector Design, Second Edition*. Institute of Transportation Engineering, Washington, D.C., 2005
- [3] Chodur J., Bąk R.: *Charakterystyki prędkości na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, Drogownictwo, 02.2012
- [4] Chodur J., Gondek S., Ostrowski K., Bąk R.: *Problemy eksploatacyjne skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na zamiejskich drogach z dużymi prędkościami*. Grant Badawczy 2540/B/T02/2009/37, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 2009 ÷ 2012
- [5] Dixon K., Kopper N., Schalkwyk I.: *Evaluating safety and operations of high-speed intersections*, Oregon State University, Corvallis, 2010
- [6] Gondek S.: *Wpływ układu detektorów ruchu na bezpieczeństwo na skrzyżowaniu z akomodacyjną sygnalizacją świetlną*. TRANSPORT Nr 2 (20) 2004 pod red. Zygmunta Strzyżakowskiego, s. 137 ÷ 142, Radom 2004
- [7] Gondek S.: *Analiza zachowania kierowców na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*. Logistyka Nr 3/2011, w wersji elektronicznej na dysku CD, s. 733 ÷ 745
- [8] Kronborg P., Davidsson F., Edholm J.: *SOS - Self Optimising Signal Control*, Transport Research Institute, Stockholm, 1997



[9] PTV AG: *Vissim 5.10 user manual*, Karlsruhe, 2008

[10] Załączniki 1, 2, 3, 4 do *Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dn. 2.07.2003 r. 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 z dn. 23.12.2003 r., poz. 2181