

# BADANIA WJAZDÓW NA SYGNALE CZERWONYM NA ZAMIEJSKICH SKRZYŻOWANIACH Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA<sup>1</sup>

**STANISŁAW GONDEK**

dr inż., Politechnika Krakowska,  
Katedra Budowy Dróg i Inżynierii  
Ruchu, 31-155 Kraków, ul.  
Warszawska 24, tel. +48 12  
628-25-39, e-mail: sgondek@  
pk.edu.pl

**RADOSŁAW BĄK**

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

**Streszczenie.** Bezpieczeństwo ruchu jest jednym z najważniejszych kryteriów projektowania skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Jednym z czynników wpływających na obniżenie poziomu bezpieczeństwa ruchu są wjazdy na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego. Problem ten nasila się wraz ze wzrostem prędkości potoku pojazdów na wlocie skrzyżowania ze względu na występowaniu tzw. strefy dylematu. W artykule skupiono się na problemie wjazdów na sygnale czerwonym na skrzyżowaniach zamiejskich z wysokimi prędkościami zlokalizowanych na drogach krajowych. W celu określenia cech wypadków na skrzyżowaniach i oszacowania wpływu strefy dylematu na ich powstawanie – najechania na tył i zderzeń bocznych – wykorzystano bazę SEWiK.

Zaprezentowano wyniki badań empirycznych obejmujących wjazdy na sygnale żółtym oraz czerwonym na podstawie przeprowadzonych pomiarów na 14 skrzyżowaniach zlokalizowanych w Polsce południowej. Bazując na fizycznym modelu ruchu pojazdów, wyznaczono zasięg strefy dylematu oraz poddano ocenie i klasyfikacji decyzje podejmowane przez kierujących w odpowiedzi na zmianę sygnału zielonego na żółty. Wyniki analiz wskazują na wysoki wpływ strefy dylematu na częstość wjazdów na sygnale czerwonym na tarczę skrzyżowania. W przypadku 26% wjazdów można mówić o intencjonalnym złamaniu przepisu zabraniającego kontynuowania jazdy. Problem intencjonalnych wjazdów na skrzyżowanie dotyczy głównie niższych prędkości jazdy. W ocenie porównawczej zagrożenia bezpieczeństwa ruchu związanego z wjazdami na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego powinno być uwzględniane wystawienie na ryzyko, obejmujące wpływ natężenia ruchu, długości cyklu i lokalizacji detektorów. **Słowa kluczowe:** inżynieria ruchu, zamiejskie skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną, bezpieczeństwo ruchu, strefa dylematu, wjazdy na sygnale czerwonym

## Wprowadzenie

Nadrzędnym celem przebudowy sieci dróg krajowych jest podniesienie poziomu bezpieczeństwa ruchu przy jednoczesnym zachowaniu pożądanych warunków ruchu. Jednym ze sposobów przekształceń układu drogowego jest wprowadzenie na skrzyżowanie sterowania za pomocą zmiennoczasowej sygnalizacji świetlnej. Do niedawna rozwiązania tego typu spotykane były głównie w miastach, strefach podmiejskich (ulicach wylotowych z miast) lub na przejściach drogowych przez większe miejscowości. Instalowanie sygnalizacji świetlnej poza terenami zabudowanymi, ukierunkowane na poprawę bezpie-

czeństwa ruchu i zapewnienie przepustowości wlotów podporządkowanych, wymaga uwzględnienia specyfiki tego typu rozwiązań – głównie ze względu na wyższe prędkości potoku pojazdów na drodze nadrzędnej, duży udział pojazdów ciężkich czy dużą dysproporcję obciążenia poszczególnych wlotów.

Sygnalizacja świetlna, poprzez segregację w czasie strumieni kolizyjnych, powinna ograniczyć liczbę wybranych typów wypadków – zwłaszcza zderzeń bocznych i czołowych oraz najechania na pieszego. Równocześnie niekorzystnym skutkiem działania sygnalizacji na ogół jest wzrost liczby zdarzeń typu najechanie na poprzedzający pojazd. W praktyce całkowita eliminacja zdarzeń drogowych, ze względu na losowość zjawiska i nieprzestrzeganie przepisów przez uczestników ruchu, mimo funkcjonującej przez całą dobę sygnalizacji w trybie trójkolorowym, jest niemożliwa. Nie wyklucza to ciągłego dążenia do poprawy bezpieczeństwa ruchu poprzez zastosowanie odpowiednich rozwiązań geometrycznych, organizacji ruchu czy systemów sterowania, ukierunkowanych na redukcję zagrożenia bezpieczeństwa ruchu. Identyfikacja zachowań użytkowników dróg, tzn. podejmowanych przez nich decyzji, respektowania sygnałów świetlnych czy też wyboru prędkości jazdy/przejścia stanowią kryteria wyboru właściwych metod sterowania.

Jedną z przyczyn wypadków pojawiających się na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną jest niestosowanie się kierujących do nakazów ustawy Prawo o ruchu drogowym [1]. Według jej zapisów (§ 95, ust. 1) zabroniony jest wjazd za sygnalizator podczas nadawania sygnału żółtego i czerwonego, przy czym dla sygnału czerwonego jest to zakaz bezwzględny. Podczas nadawania sygnału żółtego dopuszcza się wjazd za sygnalizator jedynie w sytuacji, gdy w momencie rozpoczęcia nadawania tego sygnału pojazd znajduje się tak blisko sygnalizatora, że nie może się zatrzymać przed nim bez gwałtownego hamowania. Określenie „gwałtowne hamowanie” jest nieostre, zindywidualizowane oraz zależne od sytuacji ruchowej, a przez to trudne do oszacowania przez kierującego. Obserwowana duża liczba wjazdów na sygnale czerwonym dotyczy przede wszystkim okresu zaraz po zakończeniu sygnału żółtego dla danego kierunku ruchu. Część nieprzepisowych zachowań, prowadzących do sytuacji konfliktowych, nie musi być intencjonalna, lecz może powstawać w wyniku błędu ludzkiego – niewłaściwej oceny sytuacji co do możliwości przejazdu lub zatrzymania się [2]. Tego typu sytuacje są przedmiotem badań opisanych w artykule.

<sup>1</sup> © Transport Miejski i Regionalny, 2012. Wkład autorów w publikację: S. Gonddek – 50%, R. Bąk – 50%.

## Pojęcie strefy dylematu

Podjęcie właściwej decyzji przez kierującego nie jest możliwe, gdy w momencie zmiany sygnału z zielonego na żółty znajduje się on w tzw. strefie dylematu. Pojęcie to jest znane od lat 60. XX w. i stało się przedmiotem wielu analiz – głównie zagranicznych [3, 4, 5] oraz nielicznych krajowych [6, 7]. Według klasycznej definicji kierowca znajdujący się w tej strefie w momencie rozpoczęcia nadawania sygnału żółtego nie może podjąć prawidłowej decyzji, bo ani nie zdąży przejechać linii zatrzymania w trakcie trwania sygnału żółtego, ani nie zdoła zatrzymać się przed linią zatrzymań, hamując z maksymalnym opóźnieniem, uznawanym za niekomfortowe i ryzykowne [8].

W zależności od prędkości jazdy i odległości od linii zatrzymań w momencie, gdy na sygnalizatorze rozpoczyna się nadawanie sygnału żółtego, kierowca na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną ma do wyboru 4 opcje:

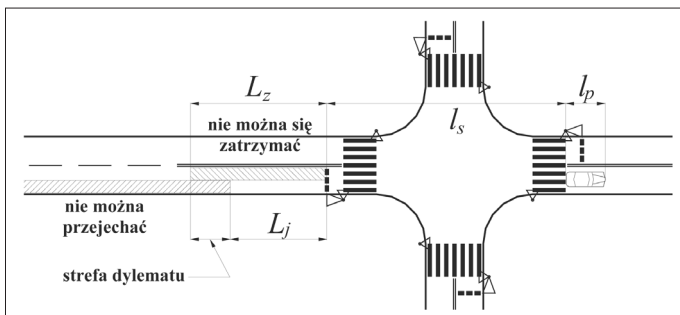
1. *musi się zatrzymać* przed linią zatrzymań,
2. *może się zatrzymać* przed linią zatrzymań *lub może kontynuować przejazd* przez skrzyżowanie (tzw. strefa opcjonalna),
3. *musi kontynuować przejazd* przez skrzyżowanie,
4. *nie może się zatrzymać* przed linią zatrzymań *ani nie może kontynuować przejazdu* przez skrzyżowanie (tzw. strefa dylematu).

W praktyce w każdej z powyższych opcji możliwy jest wjazd na sygnale czerwonym. W przypadku opcji (1) i (4) możliwy jest przejazd pojazdu przez skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego, gdy kierowca nie powinien, ale próbuje kontynuować jazdę. W przypadku opcji (3) również jest możliwy przejazd na sygnale czerwonym w przypadku błędu kierowcy, gdy próbuje się zatrzymać, a następnie zmienia zdanie i kontynuuje jazdę. W przypadku opcji (4) kierowca często podejmuje decyzję o kontynuowaniu jazdy, co skutkuje przejazdem skrzyżowania na sygnale czerwonym.

W celu zwymiarowania strefy dylematu można skorzystać z praw kinematyki i obliczyć minimalną odległość potrzebną do bezpiecznego zatrzymania pojazdu przed linią zatrzymań  $L_z$  oraz maksymalną odległość umożliwiającą przejazd pojazdu w czasie sygnału żółtego  $L_j$  (rys. 1).

Do wyznaczenia tych wielkości przyjęto następujące założenia:

- dopuszcza się wjazd pojazdu na skrzyżowanie (tzn. przejazd linii zatrzymań) do końca nadawania sygnału żółtego,



Rys. 1. Ilustracja stref na wlocie skrzyżowania przy analizie zachowania się kierowcy pojazdu w momencie zmiany sygnału z zielonego na żółty.

- przejazd pojazdu przez skrzyżowanie odbywa się ze stałą prędkością  $v_{wl}$  równą prędkości dopuszczalnej na wlocie  $v_{dop}$ , tzn.  $v_{wl} = v_{dop}$ ,
- hamowanie z normalnym opóźnieniem, bez blokowania kół, znoszone przez jadących,
- pochylenie wlotu równe 0% (teren płaski).

Na odległość zatrzymania  $L_z$  składa się odległość przejechana podczas czasu reakcji  $t_r$  i odległość przejechana podczas hamowania. Matematycznie można to zapisać:

$$L_z = v_{wl} \cdot t_r + \frac{v_{wl}^2}{2 \cdot b} \quad (1)$$

gdzie:

$L_z$  – minimalna odległość od linii zatrzymań potrzebna do bezpiecznego zatrzymania pojazdu (uwzględniająca czas reakcji kierowcy i normalne hamowanie) [m],

$v_{wl}$  – prędkość pojazdu dojeżdżającego do skrzyżowania [m/s]; zwykle przyjmuje się równą prędkości dopuszczalnej na wlocie ( $v_{wl} = v_d$ ),

$t_r$  – czas reakcji kierowcy [s]; zwykle przyjmuje się równy 1.0 s,

$b$  – opóźnienie przy hamowaniu [ $m/s^2$ ], zwykle przyjmuje się równe  $3.0 m/s^2$ .

Wartości  $b$  i  $t_r$  przyjęto na podstawie rekomendacji [9] oraz tabeli 1. Opóźnienie o wartości  $3 m/s^2$  pozwala na bezpieczne i stosunkowo komfortowe zatrzymanie się pojazdu (jest odczuwalne, ale nie w sposób uciążliwy) zarówno na suchej, jak i mokrej nawierzchni.

Tabela 1

Uciążliwość hamowania w zależności od wartości opóźnienia [10]	
$b \leq 1.5 m/s^2$	opóźnienie odczuwalne jako mało uciążliwe
$1.5 < b \leq 3 m/s^2$	opóźnienie wyraźnie odczuwalne, lecz znoszone przez jadących
$b > 3.5 m/s^2$	opóźnienie odczuwalne jako nieprzyjemne, trudności utrzymania się na nogach stojących osób
$b > 4 m/s^2$	nieprzyjemne odczucia jadących, spadanie przedmiotów z siedzeń
$b \geq 6 m/s^2$	gwałtowne szarpnięcia siedzących, możliwe wyrzucenie z siedzeń osób nie zapiętych pasami

Odległość, którą pojazd może przejechać podczas sygnału żółtego  $L_j$ , można obliczyć ze wzoru:

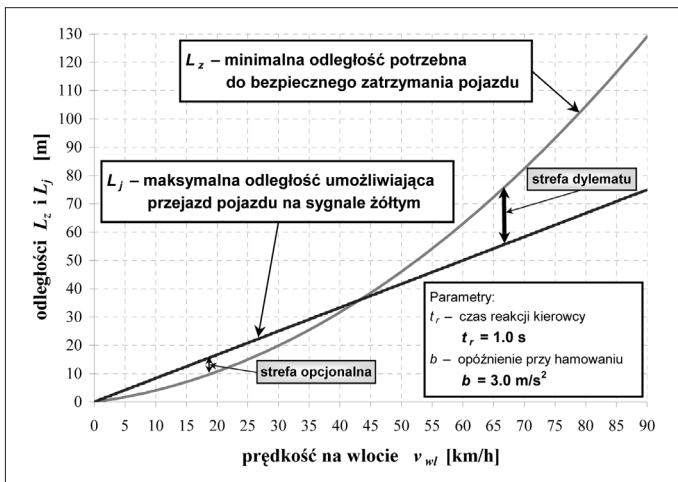
$$L_j = v_{wl} \cdot t_j \quad (2)$$

gdzie:

$L_j$  – maksymalna odległość od linii zatrzymań, dla której pojazd jeszcze przejedzie linią zatrzymań w czasie nadawania sygnału żółtego [m].

$t_j$  – długość sygnału żółtego równa 3.0 s.

Zależność odległości  $L_z$  i  $L_j$  od prędkości na wlocie  $v_{wl}$  przedstawiono na rys. 2. Różnica tych wartości wyznacza wielkość strefy dylematu (gdy  $L_z > L_j$ ) lub strefy opcjonalnej (gdy  $L_j > L_z$ ). Jak widać z wykresu, dla przyjętych wartości parametrów strefa dylematu występuje przy prędkości powyżej 43 km/h i osiąga wartość 54.2 m przy  $v_{wl} = 90 km/h$ .



Rys. 2. Zakresy i wielkości strefy dylematu i strefy opcjonalnej w zależności od prędkości dojazdu do skrzyżowania.

Według praw fizyki kierowca, który znajdzie się w strefie dylematu na początku sygnału żółtego, nie może podjąć dobrej decyzji i dlatego każda decyzja podjęta w tej strefie jest sprzeczna z przepisami ruchu drogowego. Konsekwencją wyboru decyzji o zatrzymaniu jest gwałtowne hamowanie z możliwością wpadnięcia w poślizg, najechania przez pojazd podążający za hamującym lub wjechanie na/za przejście dla pieszych. Konsekwencją wyboru decyzji o kontynuacji jazdy najczęściej jest przyspieszenie oraz przekroczenie prędkości dopuszczalnej, co i tak nie eliminuje wjazdu na skrzyżowanie podczas nadawania sygnału czerwonego. Występowanie strefy dylematu przekłada się na potencjalny wzrost zagrożenia bezpieczeństwa ruchu.

### Analiza baz wypadkowych

Potencjalne zagrożenie bezpieczeństwa ruchu związane z przełączaniem sygnałów dotyczy sytuacji:

- wjazdu na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego,
- gwałtownego hamowania w celu uniknięcia wjazdu na tarczę skrzyżowania.

W pierwszym przypadku może dojść do zderzenia z pojazdem relacji, które otrzymują zezwolenie na ruch po zmianie fazy. Konsekwencją takich zdarzeń są bardzo często ranni lub zabici z uwagi na wysoką różnicę prędkości pojazdów. Intensywne hamowanie natomiast może skutkować najechaniem na tył pojazdu przez pojazd podążający w niewielkim odstępie za pojazdem hamującym.

Do oceny występowania ww. zagrożeń na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną wykorzystano dane z Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji (SEWIK) z lat 2005–2009. Bazując na informacjach o lokalizacji skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na sieci dróg krajowych, do analizy wybrano skrzyżowania zlokalizowane w terenie niezabudowanym (prędkość dopuszczalna  $v_{dop} > 60$  km/h). Ze względu na niepełną informację o kolizjach (nie wszystkie są rejestrowane w bazie SEWIK) zostały one pominięte w zestawieniu.

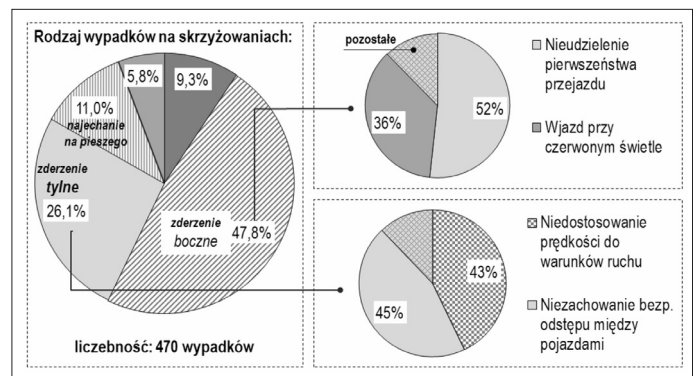
Na zinwentaryzowanych 108 skrzyżowaniach doszło do 470 wypadków, w których 702 osoby zostały ranne, a 56

poniosło śmierć. Oznacza to przeciętnie 1.1 wypadku na skrzyżowanie w przeciągu roku oraz 1.8 ofiary/skrzyżowanie/rok. Liczba ofiar śmiertelnych na 100 wypadków (wskaźnik ciężkości wypadków) wyniosła natomiast 11.9.

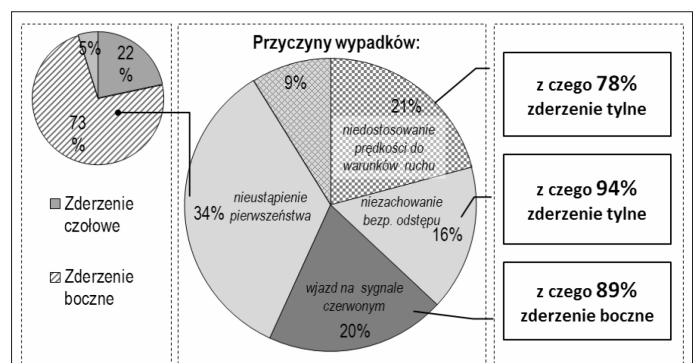
Stan baz danych nie pozwala niestety na precyzyjną ocenę roli sygnalizacji jako bezpośredniego lub pośredniego źródła zagrożenia bezpieczeństwa ruchu związanego zwłaszcza z występowaniem strefy dylematu. Jednakże pewną informację zawierać mogą zarejestrowane rodzaje wypadków (rys. 3) i ich przyczyny (rys. 4).

Zderzenia boczne, których liczba powinna być w istotnym stopniu ograniczona poprzez działanie sygnalizacji, stanowiły 48% wypadków na skrzyżowaniach zamiejskich. 36% z nich zaklasyfikowano jako skutek wjazdu na tarczę skrzyżowania podczas nadawania sygnału czerwonego. Zderzenia tylne na skrzyżowaniu stanowiły 26%. Uwzględniając przyczyny powstania tych zdarzeń zapisanych w kartach wypadkowych, można domniemywać, że spora część z nich może wynikać z niepewności co do podejmowanych decyzji przez kierowców reagujących na przełączenie sygnału zielonego na żółty (hamowanie/przejazd).

Za przyczynę 1/5 wypadków uznano wjazd na tarczę skrzyżowania w trakcie wyświetlania sygnału zabraniającego go, wskutek czego dochodziło głównie do zderzeń bocznych (73%) lub czołowych (22%). Niedostosowanie prędkości do warunków ruchu w 78% przypadków prowadziło do zderzenia tylnego (najechania na poprzedzający pojazd), podczas gdy na odcinkach drogowych wypadek tego typu stanowi 22% ogółu wypadków spowodowanych nieadekwatnym do sytuacji wyborem prędkości przez kierującego.



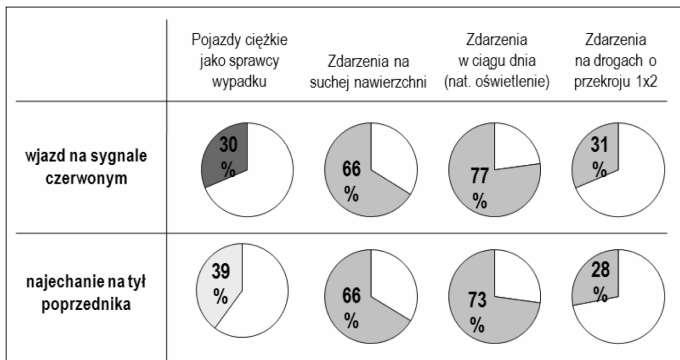
Rys. 3. Rodzaje wypadków na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną.



Rys. 4. Przyczyny wypadków na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną.

Zaskakująco wysoko w hierarchii przyczyn lokuje się nieustąpienie pierwszeństwa przejazdu. Jest to o tyle zastanawiające, że na skrzyżowaniach zamiejskich stosowana jest głównie sygnalizacja trzy-, a czasem i czterofazowa redukująca konieczność ustępowania pierwszeństwa przejazdu innym uczestnikom ruchu. Relacje o dopuszczalnej kolizji występują głównie z wlotów podporządkowanych, dla których prędkość pojazdów jest niższa, a sygnał zielony przyznawany jest wyłącznie po zgłoszeniu zapotrzebowania na fazę, toteż większość zdarzeń powinna kończyć się przede wszystkim stratami materialnymi bez ofiar (kolizje).

Zestawienie czynników towarzyszących wypadkom związanym z wjazdem na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego oraz wypadkom związanym z najechaniem na tył poprzednika nie wskazuje na wyraźne zróżnicowanie ich cech (rys. 5). Wysoki udział, jako sprawców wypadków, pojazdów ciężkich (głównie ciężarowych) nie jest wyraźny. Na najważniejszych drogach krajowych, na których głównie zlokalizowane są skrzyżowania z sygnalizacją, udział pojazdów ciężkich w ruchu może osiągać 30%. Nieznaczna nadreprezentacja pojazdów ciężarowych jako sprawców dotyczy zderzenia typu „najechanie na tył poprzednika”.



Rys. 5. Okoliczności towarzyszące wypadkom na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną.

Analiza baz danych wskazuje na potencjalnie dużą rolę wpływu zmian sygnałów jako czynnika sprzyjającego powstawaniu wypadków na zamiejskich skrzyżowaniach dróg krajowych. Powiązanie przyczyn oraz typów wypadków pozwala na założenie, że strefa dylematu jest istotnym problemem na tego typu skrzyżowaniach w kraju. Jednocześnie nie jest możliwe określenie innych czynników, które mogłyby sprzyjać niekorzystnym efektom towarzyszącym pracy sygnalizacji świetlnej jedynie na podstawie samej bazy danych, bez przeprowadzenia inwentaryzacji skrzyżowań oraz przeprowadzenia szczegółowych badań empirycznych.

### Badania empiryczne zachowań kierowców na skrzyżowaniach

W celu oceny skali zjawiska oraz poszukiwania przyczyn wjazdów pojazdów na tarczę skrzyżowania w trakcie nadawania sygnału czerwonego przeprowadzone zostały pomiary na wybranych skrzyżowaniach zamiejskich. Aby umożliwić ocenę zachowania kierujących i słuszności podejmowanej przez nich decyzji, przeprowadzono pomiar i analizę momentów przejazdu linii zatrzymania w trakcie nadawania

sygnału żółtego i czerwonego oraz prędkości pojazdów. Na części ze skrzyżowań przeprowadzono także dodatkowo pomiary prędkości pojazdów zatrzymujących się po zmianie sygnału zielonego na żółty.

Do przeprowadzenia badań empirycznych wybrano 14 poligonów zlokalizowanych w województwach małopolskim i śląskim na drogach krajowych numer 1, 4, 7 i 94, różniących się geometrią skrzyżowań i wlotów, warunkami ruchowymi oraz prędkością dopuszczalną. Szczegółowe parametry wybranych poligonów zestawiono w tabeli 2. Podstawowym kryterium doboru poligonów były lokalizacja skrzyżowania poza terenem zabudowanym (poza obszarem „białych tablic” oraz bez zabudowy w otoczeniu skrzyżowania), typ przekroju (1 x 2, 2 x 2 lub 2 x 3), prędkość dopuszczalną na wlocie  $v_{dop}$  oraz znaczne natężenie ruchu, które jednak powinno być mniejsze od przepustowości (brak lub sporadycznie występujące kolejki pozostające na analizowanych wlotach skrzyżowania). Ponadto uwzględniono potrzebę zróżnicowania cech poligonów oraz aspekt praktyczny, tj. możliwość technicznej realizacji pomiarów.

Tabela 2

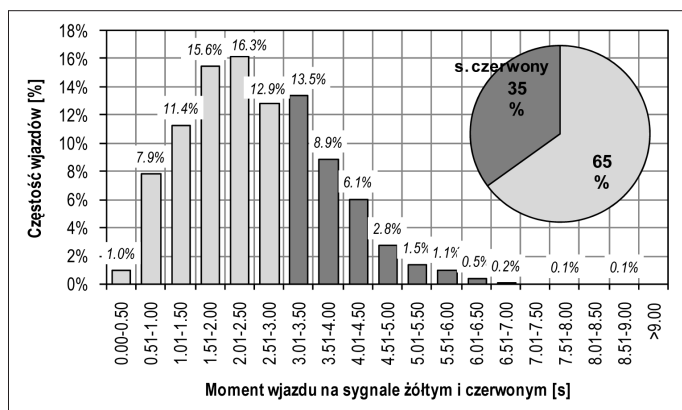
Zestawienie i charakterystyka poligonów pomiarowych oraz mierzone parametry										
Poligon	Lokalizacja			Wlot	Dane			Pomiar		
	Województwo	Droga krajowa	Miejscowość		Przekrój	$v_{dop}$	Fotoradar	Wjazdy	Prędkość	Zatrzymania
P1	M	4	Wieliczka, ul. Czarnochowska	Kraków	1 x 2	70	N	+	+	-
P2	M	4	Bodzanów	Tarnów	1 x 2	70	N	+	+	+
P3	M	4	Chelm	Kraków	1 x 2	70	N	+	+	-
P4	M	4	Sufczyn	Kraków	1 x 2	50	N	+	+	+
P5	M	7	Miechów	Warszawa	1 x 2	70	N	+	+	-
P6	M	94	Bolesław	Katowice	2 x 2	70	N	+	+	-
P7	M	94	Bolesław	Kraków	2 x 2	70	T	+	+	+
P8	S	94	Sławków, ul. Wrocławska	Katowice	2 x 2	70	N	+	+	+
P9	S	94	Sławków, ul. Zakawie	Kraków	2 x 2	70	N	+	+	+
P10	S	1	Czechowice-Dziedzice	Bielsko-Biała	2 x 2	80	N	+	+	-
P11	S	1	Goczałkowice-Zdrój	Bielsko-Biała	2 x 2	70	T	+	+	-
P12	S	1	Bрудzowice	Częstochowa	2 x 2	80	N	+	+	+
P13	S	1	Studzienice	Bielsko-Biała	2 x 2	70	N	+	+	+
P14	S	1	Podwarpie	Częstochowa	2 x 3	70	T	+	+	+

Do zbierania danych wykorzystano technikę wideorejestracji ruchu. Wybrany wlot drogi krajowej objęto kilkugodzinnym nagraniem z kilku kamer obejmujących sygnalizatory (dla identyfikacji sygnału), tarczę skrzyżowania, linię zatrzymania oraz strefę dojazdu o zasięgu wystarczającym do analizy prędkości pojazdów za pomocą metody pomiaru czasu przejazdu odcinka bazowego. Zasięg rejestracji oraz długość bazy pomiarowej dobrano do spodziewanej prędkości potoku ruchu, tak aby możliwa była analiza prędkości pojazdów w momencie przełączenia sygnału na żółty, zanim podjęta została decyzja o zmianie prędkości (zatrzymaniu/przyspieszeniu).

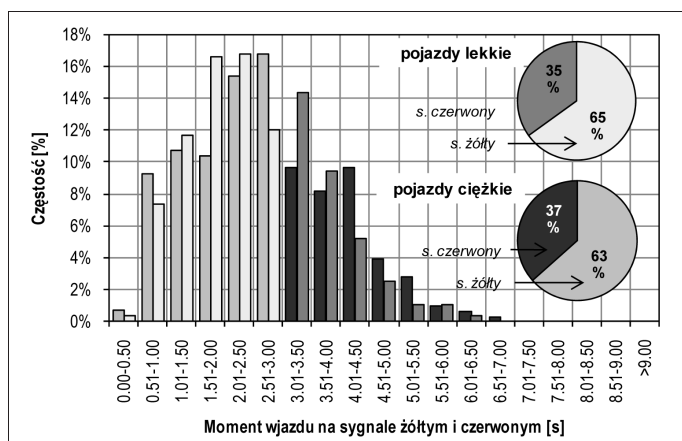
## Częstość wjazdów na sygnale żółtym i czerwonym

Dla danych zbiorczych z wszystkich poligonów na rys. 6 przedstawiono histogram momentów wjazdów na tarczę skrzyżowania, licząc od momentu zmiany sygnału zielonego na żółty. Dla próby 1241 zdarzeń, 35% z kierujących wjechało na tarczę skrzyżowania w trakcie trwania sygnału czerwonego. Nieco większą częstością wjazdów cechował się potok pojazdów ciężkich (rys. 7) – samochodów ciężarowych, ciężarowych z przyczepami i autobusów – i wynosił 37%. Pojazdy te mają ograniczoną możliwość zahamowania z uwagi na niższe wartości dysponowanego opóźnienia. Z drugiej strony niższe prędkości przejazdu powinny ułatwiać zatrzymanie się, co mogło przyczynić się do zniwelowania różnic między obiema kategoriami pojazdów.

Oprócz udziału pojazdów wjeżdżających na tarczę skrzyżowania w trakcie nadawania sygnału czerwonego istotny jest także czas wjazdu liczony od początku sygnału. Im jest on późniejszy, tym większe ryzyko zderzenia z pojazdem wjeżdżającym na skrzyżowanie w następnej fazie lub najechania na pieszego wkraczającego na przejście. Średni czas wjazdu na skrzyżowanie dla pojazdów osobowych wynosi 0.9 s, licząc od momentu przełączenia na sygnał czerwony, natomiast dla pojazdów ciężarowych wzrasta on do 1.1 s. 36% z wjazdów na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego wystąpiło później niż 1 s od zakończenia wyświetlania sygnału żółtego. Dla pojazdów ciężarowych udział ten wzrasta do 52%, co jest szczególnie



Rys. 6. Histogram częstości wjazdów na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału żółtego i czerwonego (cały potok pojazdów).



Rys. 7. Histogram częstości wjazdów na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału żółtego i czerwonego (z podziałem na pojazdy lekkie i ciężkie).

niekorzystne z uwagi na gabaryty pojazdu i często niższą prędkość ewakuacji. Rozkład momentów wjazdów na sygnale czerwonym może być opisany rozkładem wykładniczym przesuniętym (wykazano zgodność dla poziomu istotności 0.05).

W trakcie nadawania sygnału żółtego większość pojazdów kontynuuje przejazd. Przy założeniu losowości zgłoszeń pojazdów na linii zatrzymania po rozładowaniu kolejki na wlocie rozkład teoretyczny wyznaczony dla interwału  $(0 \div 3)$  s powinien być zbliżony do równomiernego. Nie dotyczy to jednakże sygnalizacji zmiennoczasowej, w której podtrzymanie sygnału dla kolejnych detektorów powinno umożliwić dojazd do linii zatrzymania w trakcie trwania sygnału zielonego. Poprawne rozmieszczenie detektorów i warunki wydłużania sygnału zielonego powinny być bardziej nastawione na ograniczenie przełączeń sygnałów, gdy czas dojazdu pojazdu w strefie detekcji do linii zatrzymania jest zbliżony do 3 – 4 s.

Liczba i rozkład częstości wjazdów na tarczę skrzyżowania podczas sygnału zabraniającego mogą być jedną z miar pośrednich oceny zagrożenia bezpieczeństwa ruchu wynikającego z przełączeń sygnałów. Nie uwzględniają one jednak wystawienia na ryzyko – prawdopodobieństwa zajścia sytuacji, w której kierujący będzie mógł popełnić błąd, podejmując decyzję o wjeździe na skrzyżowanie. Uwzględniając, że czynnikami wpływającymi na znalezienie się pojazdu w strefie dylematu są natężenie ruchu oraz parametry programu sygnalizacji określające częstość przełączeń sygnałów (długość cyklu, warunki podtrzymania i przerywania sygnału zielonego), zaproponowano wskaźniki oceny częstości wjazdów na tarczę skrzyżowania w trakcie nadawania sygnału czerwonego:

$L_{CO}$  – liczba wjazdów na sygnale czerwonym w ciągu 1 godziny na pasie ruchu  $[P_{wj}/h/pas]$ ,

$L_{CI}$  – liczba wjazdów na skrzyżowanie po 1 s od zakończenia sygnału żółtego w ciągu 1 godziny na pasie ruchu  $[P_{wj}/h/pas]$ ,

$L_{TT}$  – liczba wjazdów na sygnale czerwonym na pasie ruchu na cykl  $[P_{wj}/cykl/pas]$ ,

$L_{QQ}$  – liczba wjazdów na sygnale czerwonym na pasie ruchu w odniesieniu do godzinowego natężenia ruchu na pasie ruchu  $[P_{wj}/P/pas]$ ,

$L_{TQ}$  – stosunek intensywności wjazdów na sygnale czerwonym w godzinie do natężenia ruchu i liczby przełączeń sygnałów w godzinie  $[P_{wj}/P/cykl/pas]$ ,

$L_{ZC}$  – stosunek liczby wjazdów na sygnale czerwonym do liczby wjazdów pojazdów na sygnale żółtym i czerwonym.

W tabeli 3 przedstawiono obliczone wartości zaproponowanych wskaźników dla wybranych wlotów skrzyżowań zamiejskich oraz porównanie wskaźników dla skrzyżowania P7 i P12.

Wskaźniki  $L_{CO}$ ,  $L_{CI}$  mówią o skali zjawiska. Wskaźniki  $L_{TT}$ ,  $L_{QQ}$  i  $L_{TQ}$  podają informację o wjazdach na tarczę skrzyżowania względem natężenia ruchu i/lub liczby przełączeń sygnałów. Można zaproponować wykorzystanie ich do oceny funkcjonowania skrzyżowania w zakresie programu sy-

gNALIZACJI czy układu detektorów. Przykładowo, mimo że liczba wjazdów na skrzyżowanie P7 w stosunku do P12 jest około 70% większa, to, jeśli uwzględnić liczbę wyświetleń sygnału żółtego w godzinie, wzrost wskaźnika  $L_{TT}$  jest ponad 2.5-krotny, a  $L_{OO}$  3.6-krotny. Może to oznaczać, że sam wzrost natężenia ruchu nie jest jedynym wytłumaczeniem większej częstości niedozwolonych wjazdów na tarczę skrzyżowania. Celowe byłoby poszukiwanie innych przyczyn nieuprawnionych wjazdów na skrzyżowaniu P7.

Tabela 3

Wskaźniki częstości wjazdów na tarczę skrzyżowania w trakcie nadawania sygnału czerwonego						
Lp	Wskaźnik	Jednostka	P2 Bodzanów	P7 Bolesław	P12 Brudzowice	P12 / P7 Porównanie
1	$L_{CO}$	$[P_w/h/pas]$	2,2	5,7	3,4	0,59
2	$L_{C1}$	$[P_{w1}/h/pas]$	1,5	3,3	1,7	0,52
3	$L_{TT}$	$[P_w/cykl/pas]$	0,04	0,18	0,07	0,37
4	$L_{OO}$	$[P_w/P/pas]$	3,23	4,38	1,21	0,28
5	$L_{TO}$	$[P_{w1}/P/cykl/pas]$	0,60	1,35	0,23	0,17
6	$L_{ZC}$	$[P_w/P_{wz+c}]$	42%	48%	43%	0,90

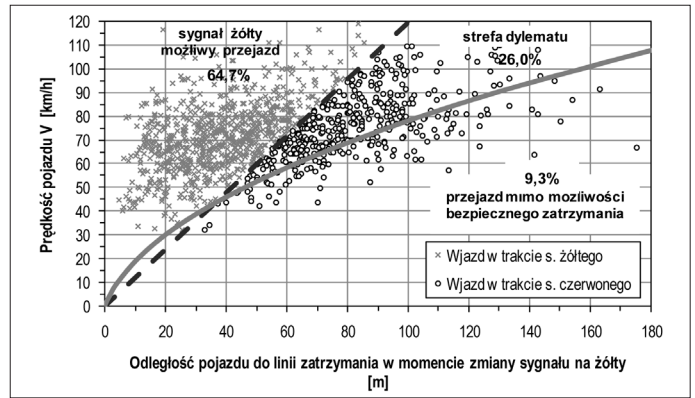
Należy podkreślić złożoność wpływu przeciętnej realizowanej oraz maksymalnej przewidzianej programem akomodacyjnym długości cyklu i natężenia ruchu na liczbę wjazdów na skrzyżowanie podczas sygnału czerwonego. Wyższe natężenia ruchu zwiększają prawdopodobieństwo znalezienia się pojazdu w strefie dylematu, a także osiągnięcia maksimum sygnału zielonego akomodowanej grupy sygnałowej. Z drugiej strony długość cyklu oraz liczba przełączeń sygnałów w godzinie maleją. Jeśli układ detektorów oraz algorytm sterowania uwzględni problem strefy dylematu, dla niższych natężeń ruchu powinna być rejestrowana mniejsza liczba wjazdów na sygnale czerwonym przy jednoczesnym skróceniu cyklu sygnalizacji.

### Zachowania kierujących w strefie dylematu

Istotną kwestią zasygnalizowaną wcześniej jest ocena przyczyn wjazdu na skrzyżowanie, gdy nadawany jest sygnał zabraniający. Część z takich wjazdów może wynikać z obawy lub niechęci do gwałtownego zatrzymania się, którego konieczność rośnie wraz ze wzrostem prędkości pojazdu. Strefę dylematu dla każdego pojazdu wjeżdżającego na sygnale czerwonym wyliczano ze wzorów (1) i (2), podstawiając jako prędkość wlotową wyznaczoną prędkość pojazdu na podstawie czasu przejazdu odcinka bazowego.

Na rysunku 8 przedstawiono lokalizację strefy dylematu wraz z wynikami badań empirycznych zachowań zatrzymujących się pojazdów. Ze wszystkich pojazdów wjeżdżających na tarczę skrzyżowania po zakończeniu sygnału zielonego 26% znajdowało się w strefie dylematu. Prawie 74% kierowców wjeżdżających na sygnale czerwonym nie mogło bezpiecznie zahamować. Pozostałe 26% kierujących miało możliwość komfortowego zatrzymania się, a mimo to kontynuowało przejazd, co można utożsamiać ze świadomym złamaniem przepisów ruchu drogowego.

Inną formą niezastosowania się do przepisów jest przekroczenie prędkości dopuszczalnej. Udział przekraczają-



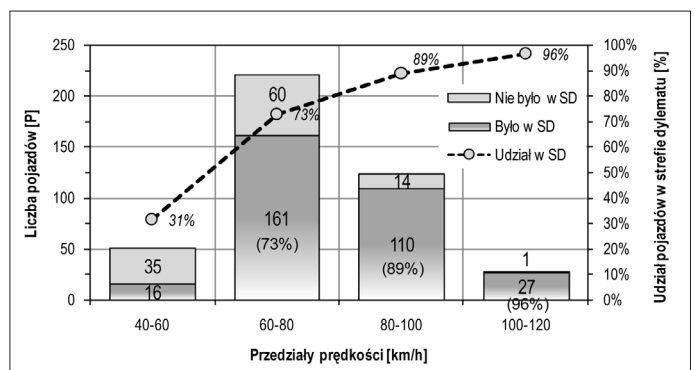
Rys. 8. Zasięg strefy dylematu wyznaczony ze wzorów (1) i (2) wraz z wynikami badań empirycznych zachowań kierujących wjeżdżających na tarczę skrzyżowania.

cych prędkość dopuszczalną wyniósł 57%, a poruszających się szybciej niż 20 km/h ponad dopuszczalny limit 12%.

Udział pojazdów znajdujących się w strefie dylematu w zależności od prędkości pokazano na rys. 9. Wynika z niego, że proporcjonalnie najwięcej wjazdów spoza strefy dylematu odbywa się przy niskich prędkościach jazdy. Można wysunąć następujące hipotezy próbujące objaśnić to zjawisko:

- kierowcy poruszający się wolniej w momencie zmiany sygnału na żółty znajdują się bliżej linii zatrzymania – pozwala to na lepszą obserwację sytuacji na tarczy skrzyżowania oraz pozostałych wlotach, co ułatwia podjęcie ryzykownej decyzji o wjeździe na skrzyżowanie;
- kierowcy oceniają możliwość dojazdu do linii zatrzymania głównie na podstawie odległości wyrażonej w metrach, niedoszacowując czynnik niskiej prędkości (popołniają błąd).

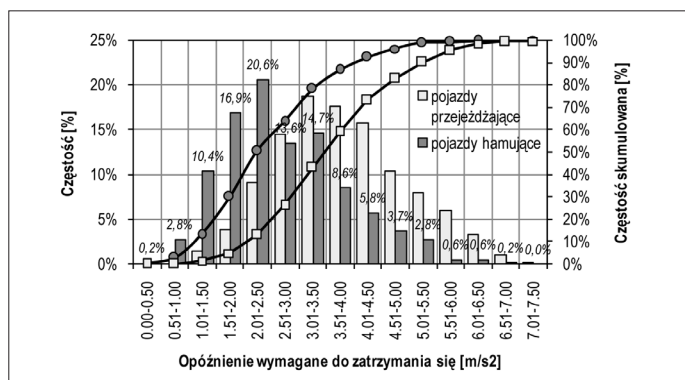
Wyznaczony zasięg strefy dylematu, a więc i przedstawiona ocena zachowania kierowców na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną są w pewnym stopniu arbitralne – bazują bowiem na założeniach dotyczących wartości czasu reakcji kierującego  $t_r$  i bezpiecznego opóźnienia przy hamowaniu  $b$  obejmującego całą populację kierowców. Założenia te nie muszą być spełnione w przypadku poszczególnych kierowców. Czas reakcji  $t_r$  jest zmienną losową zależną od wielu czynników (głównie cech psychofizycznych kierowcy) [1], podobnie jak wartość opóźnienia  $b$ , z jakim kierowca danego pojazdu może hamować. Częściową informacją o rzeczywistych zachowaniach kierujących może być analiza potoku pojazdów, które zatrzymały



Rys. 9. Histogram liczebności pojazdów wjeżdżających na tarczę skrzyżowania w trakcie sygnału czerwonego w zależności od prędkości z podziałem na znajdujące się w strefie dylematu i poza nią.

się przed linią zatrzymania po zmianie sygnału na żółty. Rzeczywiste opóźnienia mogą być większe od założonej wartości granicznej. Przekształcając wzór (1), obliczono wymaganą wartość opóźnienia dla każdego z pojazdów, która była potrzebna do zatrzymania się pojazdu przed linią zatrzymania. 37% z kierujących, którzy zdecydowali się zatrzymać, hamowało z opóźnieniem przekraczającym założoną wartość. Mimo zatrzymania się przed linią warunkowego zatrzymania (część z pojazdów, głównie ciężkich, zatrzymywała się na tarczy skrzyżowania), w przypadku poruszania się w ruchu kolumnowym, mogło zostać wygenerowane zagrożenie najechania na tył przez pojazd poruszający się w niedużym odstępie.

Dla skrzyżowań, na których pomiarem objęto także pojazdy, które zatrzymały się po zmianie sygnału, ustalono, że 47% kierujących, którzy znaleźli się w strefie dylematu, decydowało się kontynuować przejazd. 53% kierujących zatrzymywało się z opóźnieniem przekraczającym 3.0 m/s<sup>2</sup>. Jeśli wyróżnić grupę pojazdów ciężkich, proporcje zmieniały się – 66% pojazdów ciężarowych znajdujących się w strefie dylematu wjeżdżało podczas sygnału czerwonego na tarczę skrzyżowania, a jedynie 34% decydowało się zatrzymać.



Rys. 10. Histogram i dystrybuanta opóźnienia pojazdów zatrzymujących się przed sygnalizatorem oraz wymaganego opóźnienia do zatrzymania pojazdów wjeżdżających na skrzyżowanie wyznaczone ze wzoru (1).

## Podsumowanie

Wjazdy na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną są zauważalnym problemem. Stanowią one przyczynę ok. 20% wypadków zarejestrowanych w bazie SEWIK dla odcinków poza terenem zabudowy. W porównaniu z odcinkami drogowymi, wysoki jest na skrzyżowaniach z sygnalizacją także udział zderzeń typu najechanie na poprzedzający pojazd. Oba z rodzajów wypadków mogą być konsekwencją występowania tzw. strefy dylematu. Przeprowadzone badania zachowań kierujących pojazdami potwierdzają występowanie problemu zarówno wjazdów na sygnale czerwonym, jak i hamowania z dużą wartością opóźnienia, zwłaszcza dla wyższych prędkości pojazdów.

Przyjmując definicję strefy dylematu, wynikającą z równań kinematyki ruchu, można w sposób uproszczony ocenić intencjonalność wjazdów na skrzyżowanie po zakończeniu wyświetlania sygnału żółtego. W większości przypadków wjazdy na tarczę skrzyżowania po zmianie sygnałów związane są z występowaniem strefy dylematu (74%), natomiast

26% w sposób świadomy lub na skutek błędu oceny sytuacji decydowała się przejechać przez skrzyżowanie, mimo możliwości bezpiecznego i komfortowego zatrzymania się. Udział wjazdów spoza strefy dylematu dotyczy przede wszystkim niższych prędkości jazdy. Dla prędkości o ponad 10 km/h wyższej od dopuszczalnej spada on do wartości nie przekraczającej 10%. Oznacza to, że kontrola prędkości na skrzyżowaniach nie jest wystarczającym środkiem poprawy bezpieczeństwa ruchu i powinna być stosowana wraz z systemem kontroli wjazdów na tarczę skrzyżowania oraz nadzoru strefy kolizji. Wyniki obliczeń zaproponowanych w artykule wskaźników częstości wjazdów pojazdów w trakcie sygnału czerwonego zwracają uwagę na możliwości poprawy bezpieczeństwa ruchu poprzez zmianę parametrów sygnalizacji i logiki sterowania na skrzyżowaniach zamiejskich.

Inną z metod podniesienia poziomu bezpieczeństwa ruchu może być wdrożenie systemu rejestrującego wjazdy na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału czerwonego. Rejestracja wykroczenia jednakże powinna dotyczyć pojazdów znajdujących się poza strefą dylematu, które mogły się zatrzymać w sposób nie powodujący dużego przeciążenia i odczucia dyskomfortu dla pasażerów. Oprócz rejestracji wykroczenia zasadna byłaby analiza prędkości pojazdów, co pozwoliłoby na karanie kierujących wjeżdżających celowo na tarczę skrzyżowania, a nie w wyniku błędnej oceny sytuacji. W tym celu przydatne byłoby wypracowanie kryteriów i metody oceny decyzji przez kierujących. Oprócz kinematycznego opisu strefy dylematu korzystnym byłoby ujęcie czynnika losowości w modelowaniu zachowań kierujących przy dojeździe i przejeździe przez wlot skrzyżowania z sygnalizacją świetlną.

Celowe jest prowadzenie dalszych badań nad czynnikami wpływającymi na zachowania kierujących i ich reakcji na zmianę sygnału oraz rozwój miar pośrednich oceny bezpieczeństwa ruchu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną związanych z tym zagadnieniem.

## Literatura

1. Rozporządzenie Ministrów Infrastruktury oraz Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 31 lipca 2002 r. w sprawie znaków i sygnałów drogowych, Dz. U. Nr 170, poz. 1393, Warszawa, 12.10.2002.
2. Dewar R., Olson P. L., *Human factors in traffic safety*, 2002.
3. Heng Wei., *Characterize Dynamic Dilemma Zone and Minimize its Effect at Signalized Intersections*, OTC Research Project Report, 2008.
4. Dixon K.K, Kopper N., Schalkwyk I., *Evaluating safety and operations of high-speed intersections*, Oregon State University, Corvallis, 2010.
5. Urbanik T., Koonce P., *The Dilemma with Dilemma Zones*, Transportation Research Record, Washington 2007.
6. Gondek S., *Analiza zachowania kierowców na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, „Logistyka”, 2011, nr 3 (w wersji elektronicznej na dysku CD).
7. Gondek S., *Wpływ układu detektorów ruchu na bezpieczeństwo na skrzyżowaniu z akomodacyjną sygnalizacją świetlną*, Transport, 2004, nr 2 (20), Radom 2004.
8. Gazis D., Herman R., Maradudin A., *The problem of the amber signal light in traffic flow*, „Operations Research”, 1960, vol. 8.
9. Pilne J.L., *Traffic Engineering Handbook*, Fifth Edition, Institute of Transportation Engineers, 1999.
10. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego – teoria i praktyka*, WKŁ, Warszawa 2008.