



JANUSZ CHODUR

Politechnika Krakowska
jchodur@pk.edu.pl



MARIAN TRACZ

Politechnika Krakowska
mtracz@pk.edu.pl

Specyfika skrzyżowań z sygnalizacją świetlną zlokalizowanych poza terenem zabudowy

Znaczne zagrożenie bezpieczeństwa ruchu oraz trudności z przejazdem/przejściem skrzyżowań na drogach poza terenem zabudowy przez pojazdy/piesznych relacji podporządkowanych coraz częściej skłaniają zarządzających drogami do stosowania skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Spodziewana poprawa bezpieczeństwa ruchu po wprowadzeniu sygnalizacji świetlnej determinowana jest jednak spełnieniem wielu warunków w zakresie geometrycznego ukształtowania skrzyżowania, organizacji ruchu i sposobu sterowania oraz spójności tych elementów. Skrzyżowanie z zainstalowaną sygnalizacją powinno gwarantować również sprawność ruchową, która zależy także od elementów zastosowanego.

Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną zlokalizowane na drogach poza terenem zabudowy mają swoją specyfikę, na którą składają się następujące cechy:

- duże prędkości ruchu na drodze głównej, znacznie przekraczające prędkość dopuszczalną na terenie zabudowy,
- duża dysproporcja obciążenia kierunku głównego (drogi krajowej) i drogi podporządkowanej,
- nieznaczny ruch pieszych, najczęściej związany z przystankami komunikacji zbiorowej, wymagający zapewnienia fazy umożliwiającej bezpieczne przejście przez drogę z pierwszeństwem przejazdu, która ma znaczący udział w cyklu sygnalizacyjnym, nie zawsze adekwatny do natężeń ruchu na drodze bocznej,
- znaczny udział pojazdów ciężkich w potokach ruchu na drodze głównej, w tym samochodów ciężarowych z przyczepami,
- brak intensywnego zagospodarowania otaczającego skrzyżowanie, co pozwala na dopasowanie geometrii wlotów do potrzeb ruchowych i sterowania.

Ta charakterystyka odpowiada również skrzyżowaniom zlokalizowanym w obrębie miast w arteriach o prędkości podwyższonej w stosunku do dopuszczalnej w terenie zabudowy i cechujących się także niewielkim ruchem pieszym.

Skrzyżowania na drogach poza terenem zabudowy wyposaża się często w sygnalizację świetlną, nie proponując jednak niezbędnych rozwiązań towarzyszących, oddziałujących na zachowania uczestników ruchu, zwłaszcza regulujących prędkość dojazdu i przejazdu przez skrzyżowanie. Obecnie do sterowania ruchem wykorzystuje się zaawansowane sy-

gnalizacje akomodacyjne (także częściowo akomodacyjne) lub acykliczne z detekcją przy pomocy czujników indukcyjnych lub wideodetektorów. Ze względu na znaczną zmienność potoków ruchu, należy umiejętnie przygotowywać algorytm sterowania preferujący płynność ruchu na drodze nadrzędnej (która często jest drogą krajową lub wojewódzką) i zapewniający przepustowość dla potoków z wlotów drogi bocznej. Sygnalizacja powinna również zapewnić ochronę strefy dylematu na dojeździe do skrzyżowania, której długość zwiększa się ze wzrostem prędkości ruchu na wlotach drogi głównej. Jest to niezmiernie istotne dla minimalizacji wjazdów na sygnale czerwonym, gdyż kierujący pojazdem znajdujący się w strefie dylematu w momencie rozpoczęcia nadawania sygnału żółtego może nie podjąć prawidłowej decyzji, ponieważ 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.

Dotychczas brak jest istotnych uregulowań w zakresie sterowania, zwłaszcza wymagań odnośnie tworzenia algorytmu sterowania, co powoduje znaczną dowolność rozwiązań w tworzonej dokumentacji, jak też eksploatacji sygnalizacji, w której wymagany (określony w warunkach zamówienia) sterownik często determinuje strategię sterowania.

Z natury działania sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniu wynika segregacja w czasie krzyżujących się potoków ruchu, co wymusza okresowe zatrzymania pojazdów zarówno na kierunku głównym, jak i bocznym, w wyniku których kierowcy ponoszą straty czasu. Zazwyczaj następuje spadek przepustowości wlotów kierunku nadrzędnego. Jest to szczególnie istotny problem w kontekście potrzeby utrzymania sprawności sieci dróg poza terenem zabudowy, w tym dróg krajowych. Na drogach tych sygnalizacja świetlna, w połączeniu z wyższymi niż na terenie zabudowy prędkościami dojazdu i ewakuacji, może stwarzać wysokie zagrożenia bezpieczeństwa ruchu drogowego. Bezpieczeństwo ruchu i warunki ruchu pojazdów z kierunków bocznych najczęściej poprawiają się, ale powstają nowe, nie do końca poznane zagrożenia związane z przejazdem przy sygnalizacji pojazdów z kierunku głównego.

W obecnie dostępnej literaturze krajowej (z wyjątkiem niewystarczającego zakresu danych w [5]), jak i w znanej autom literaturze światowej brak jest kryteriów stosowania skrzyżowań z sygnalizacją na drogach poza terenami zabudowy, jak również wytycznych ich projektowania w zakresie geometrii, organizacji ruchu oraz sterowania, a także szczegółowego opisu specyfiki ich funkcjonowania. W celu stwo-

zenia naukowych i empirycznych podstaw umożliwiających przynajmniej częściowe wypełnienie tej luki, w Katedrze Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu Politechniki Krakowskiej w latach 2009–2012 prowadzono prace badawcze w ramach grantu „Problemy eksploatacyjne skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na drogach krajowych z wysokimi prędkościami” (NCN nr N N509 254037) [3].

Specyfika geometrii skrzyżowań

Skrzyżowania drogowe zlokalizowane na terenach zabudowy i poza nimi projektuje się nieco inaczej, kładąc większy nacisk na względy dynamiki ruchu w przypadku skrzyżowań poza terenem zabudowy, a na sprawność obsługi różnych uczestników ruchu w przypadku skrzyżowań na terenie zabudowy. W projektowaniu skrzyżowań uwzględnia się kilka grup kryteriów wspólnych dla skrzyżowań o różnej lokalizacji [5, 7]. Rzadko spotyka się oddzielne wskazania (wytyczne) do projektowania skrzyżowań poza terenem zabudowy. Szczególnym problemem jest regulacja ruchu na tych skrzyżowaniach za pomocą sygnalizacji. Wobec braku szczegółowych uregulowań w przepisach [8] coraz częściej stawiane jest pytanie, czy zasady sterowania stosowane powszechnie w miastach mogą być przeniesione na skrzyżowania poza terenem zabudowy? Na to pytanie starali się odpowiedzieć autorzy projektu badawczego [3]. Podjęte badania identyfikacyjne prowadzono zarówno w odniesieniu do wytycznych projektowych, jak też w odniesieniu do rzeczywistych rozwiązań skrzyżowań.

Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych z 2001 roku [5] zalecały ograniczenie stosowania poza terenem zabudowy skrzyżowań, na których ruch jest regulowany za pomocą sygnalizacji świetlnej. Jednak względy bezpieczeństwa, jak również potrzeby ruchowe, wskazują coraz częściej na potrzebę zastosowania takich rozwiązań. Obecnie na skrzyżowaniach poza terenem zabudowy spotyka się dość dużo sygnalizacji i ciągle wprowadza się nowe, zwłaszcza na odcinkach dróg krajowych między większymi ośrodkami miejskimi, jak również na przejściach dróg krajowych przez małe miejscowości, których obszary lokalnie traktowane są jako niezabudowane (rozproszone zabudowania). Prędkość miarodajna na odcinkach tych dróg jest zazwyczaj większa niż 80 km/h i jeżeli istnieją wyraźne wskazania, aby ruch na skrzyżowaniu był regulowany za pomocą sygnalizacji świetlnej, to dopuszczalna prędkość na wlotach powinna być odpowiednio obniżona, zazwyczaj do 70 km/h [5]. Projektowanie nowych skrzyżowań z sygnalizacją świetlną w takich obszarach wynika przede wszystkim z konieczności poprawy warunków bezpieczeństwa ruchu, a także zwiększenia przepustowości skrzyżowania z położeniem nacisku na priorytet dla pojazdów poruszających się po drodze krajowej. Pomocne przy podejmowaniu decyzji o wybudowaniu skrzyżowania z sygnalizacją świetlną lub jej instalacji, może być uwzględnienie i wyważenie kilku kryteriów [8]:

- natężenia ruchu kołowego i pieszego, a w obszarach podmiejskich także rowerowego i tramwajowego na drodze z pierwszeństwem i podporządkowanej,

- warunków widoczności i czytelności rozwiązania funkcjonującego bez sygnalizacji,
- możliwości wprowadzenia innego rozwiązania geometrycznego,
- znaczenia arterii komunikacyjnej.

Podstawowymi formami skrzyżowań z sygnalizacją świetlną są preferowane skrzyżowania skanalizowane oraz skrzyżowania zwykle o nieposzerzonych, jak i poszerzonych wlotach. Zakres rozbudowy skrzyżowania zależy od klas krzyżujących się dróg, prędkości miarodajnej, natężeń ruchu oraz przyjętego sposobu sterowania ruchem.

W przypadku skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, istnieje ścisły związek pomiędzy rozwiązaniem geometrycznym skrzyżowania i regulacją ruchu za pomocą sygnalizacji świetlnej. W projektowaniu takich skrzyżowań należy rozróżnić dwa przypadki: projektowanie skrzyżowania z sygnalizacją oraz projektowanie sygnalizacji na istniejącym skrzyżowaniu, często bez zmiany jego geometrii. W pierwszym przypadku celowe i możliwe jest wzajemne dostosowanie cech geometrii skrzyżowania, organizacji ruchu oraz sygnalizacji dla uzyskania optymalnego efektu z uwzględnieniem różnych kryteriów. W drugim przypadku projektowanie przebiega z ograniczeniami narzuconymi przez istniejące rozwiązanie skrzyżowania. Możliwy jest też wariant pośredni, w którym wprowadza się częściowe (ograniczone) dostosowanie geometrii skrzyżowania do potrzeb sterowania.

W tabeli 1 zamieszczonej na następnej stronie przedstawiono zidentyfikowane różnice projektowe w zakresie rozwiązań skrzyżowań z sygnalizacją na terenach zabudowy i poza nimi.

Wytyczne zagraniczne [6, 10, 11], podobnie jak i polskie, w ogólnych wymaganiach podają, że konstrukcja skrzyżowania ma zapewniać bezpieczny i czytelny przejazd skrzyżowania, zarówno przez pojazdy samochodowe, jak i rowerzystów oraz przejścia pieszych. Głównymi czynnikami, które należy uwzględnić przy projektowaniu skrzyżowania są:

- a) czynniki ludzkie – czas reakcji kierowcy, nawyki pieszych i kierowców,
- b) obciążenie ruchem – wielkość natężenia ruchu, charakterystyka pojazdów,
- c) elementy fizyczne – uwzględnienie topografii obszaru, kąta przecięcia dróg oraz inne czynniki środowiskowe,
- d) czynniki ekonomiczne – koszt budowy, wpływ na pobliskie otoczenie,
- e) funkcja drogi i obszaru skrzyżowania.

Bezpieczne oraz sprawne pokonanie skrzyżowania osiągnięte jest przeważnie poprzez ograniczenie liczby punktów kolizji, czytelność obszarów kolizji oraz ograniczenie częstości kolizji.

Podjęte analizy istniejących skrzyżowań miały na celu identyfikację rozwiązań typowych oraz rzadziej stosowanych skrzyżowań poza terenem zabudowy. Dla porównania i określenia specyfiki stosowanych rozwiązań zostały także przeanalizowane skrzyżowania miejskie o podobnych klasach technicznych i przekrojach krzyżujących się dróg. Ocenie porównawczej poddano łącznie 40 skrzyżowań zlokalizowanych poza terenem zabudowy oraz 31 miejskich z kilku województw (małopolskie, śląskie, pomorskie, mazowieckie, wielkopolskie, łódzkie).

Tabela 1. Porównanie cech projektowych skrzyżowań z sygnalizacją na i poza terenem zabudowy [3, 5, 7]

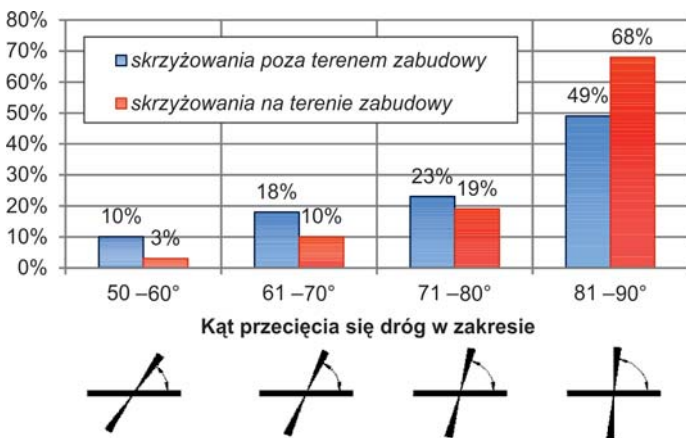
Cechy	Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną		komentarz
	teren zabudowy	poza terenem zabudowy	
Prędkość miarodajna	mniejsza $v_d = 30-70$ km/h $v_m = 40-90$ km/h	większa $v_p = 40-120$ km/h $v_m = 60-100$ km/h	Zależy od prędkości projektowej v_p poza terenem zabudowy i od prędkości dopuszczalnej v_d na terenie zabudowy a także od szerokości jezdni i jej krętości
Redukcja prędkości	nie	tak	Poza terenem zabudowy ze względów bezpieczeństwa ruchu stosuje się znaki ograniczające prędkość (najczęściej do 70 km/h)
Minimalna odległość widoczności na krzywoliniowym odcinku wlotu	mniejsza 20–120	większa 35–180 m	Zależy od prędkości miarodajnej
Minimalna zalecana odległość między sąsiednimi skrzyżowaniami	mniejsza 300–3000 m	większa 500–5000 m	Zależy także od klasy technicznej drogi
Szerokość pasa ruchu na wlocie	różnie ¹⁾ 2,50–5,00 m	różnie 2,50–5,00 m	Zależy od klasy technicznej drogi, rodzaju wlotu (z pierwszeństwem, podporządkowany), kanalizacji
Skos załamania w planie krawędzi jezdni drogi na skrzyżowaniu skanalizowanym	większy 1:10 (1:5)–1:20 (1:15)	mniejszy 1:10–1:40 (1:30)	Zależy od prędkości miarodajnej
Wyspy typu „duża kropla”	nie stosuje się	stosuje się na wlotach podporządkowanych	Zdarzają się wyjątki. Zastosowanie, ukształtowanie i wzajemne komponowanie zależy od natężeń ruchu, organizacji ruchu, geometrii skrzyżowania. Wyspy typu „duża kropla” najlepiej stosować w połączeniu z wyspami trójkątnymi. Inne są funkcje wysp na terenie zabudowy i poza nim
Wyspy typu „mała kropla”	nie stosuje się	stosuje się na wlotach podporządkowanych	
Wyspa trójkątna	stosuje się	stosuje się częściej	
Maksymalne zalecane pochylenia podłużne wlotów	mniejsze 3%–4%	większe 4%–6%	Zależy od klasy technicznej drogi
Przejścia dla pieszych na skrzyżowaniu z sygnalizacją	stosuje się	stosuje się w mniejszym zakresie	Sposób prowadzenia pieszych zależy od potrzeb ruchu pieszego oraz organizacji ruchu na skrzyżowaniu (sterowania ruchem)
Szerokość przejść dla pieszych	różnie	różnie ²⁾	Zależy od natężenia ruchu pieszych, prędkości pieszych, czasu trwania cyklu, długości sygnału zielonego dla pieszych
Intensywność ruchu pieszego	większa	mniejsza	Poza terenem zabudowy często bardzo mała
Sposób sterowania	– różna liczba faz, – mniej zróżnicowane długości faz, – stan przy braku wzbudzeń – różne strategie sterowania	– zazwyczaj 3 fazowe, – dominuje długość fazy na kierunku głównym, – stan przy braku wzbudzeń – wymagany „preference”	W większych miastach wprowadza się również priorytety dla komunikacji zbiorowej
Koordinacja sygnalizacji	stosowana często	stosowana rzadko	W miastach stosuje się koordynację sieciową lub liniową. Poza terenem zabudowy zastosowanie zależy od odległości pomiędzy sąsiednimi skrzyżowaniami – może występować na obwodnicach
Czasy międzzielone	zróżnicowane	zróżnicowane	Poza terenem zabudowy stosuje się większą prędkość dojazdu do punktu kolizji. Przeciętne drogi ewakuacji są trochę krótsze
Wymagany minimalny poziom swobody ruchu na skrzyżowaniu	niższy PSR III–IV	wyższy PSR II–III	Zależy od klasy drogi i rodzaju wlotu (z pierwszeństwem, podporządkowany)
Dodatkowe pasy ruchu do skrętu w prawo lub w lewo	krótsze strefy zmiany pasa ruchu i zwalniania	dłuższe strefy zmiany pasa ruchu i zwalniania	Stosuje się na terenie zabudowy w celu zapewnienia przepustowości skrzyżowania i bezpieczeństwa. Poza terenem zabudowy by poprawić dostrzegalność skrzyżowania i podnieść bezpieczeństwo ruchu. Długość zależy od prędkości miarodajnej i od pochylenia podłużnego wlotu
Pasy o specjalnym przeznaczeniu	stosuje się	nie stosuje się	W obszarach miejskich wprowadza się dla komunikacji zbiorowej
Oświetlenie skrzyżowań	wymagane	stosowane na odcinku min. 100 m przed skrzyżowaniem	Poza terenem zabudowy stosuje się jeśli występuje ruch pieszych lub jedna z krzyżujących się dróg jest oświetlona
Soczewki sygnalizatorów	20 cm	30 cm	Wszędzie gdzie $v > 60$ km/h oraz w sygnalizatorach kierunkowych i wiszących stosuje się 30 cm

¹⁾ Na terenie zabudowy może występować większe zróżnicowanie szerokości pasów ruchu, w zależności od dostępnego miejsca.

²⁾ Częściej wąskie przejścia, o minimalnej szerokości równej 4,0 m.

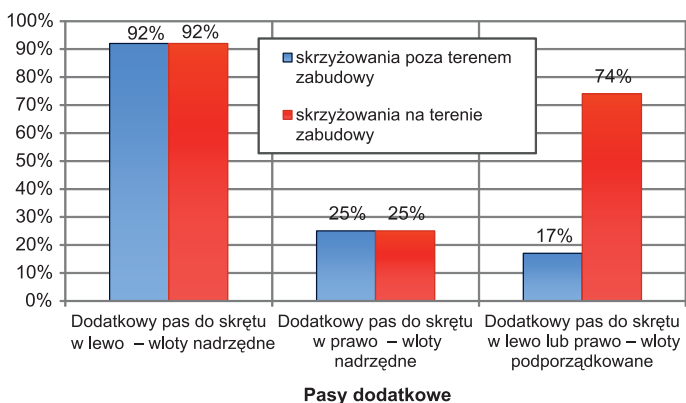
Poniżej przedstawiono porównania w zakresie kilku wybranych cech skrzyżowań:

- W zakresie kąta przecięcia się osi dróg, na skrzyżowaniach poza terenem zabudowy częściej niż w miastach występują odchyłki większe od 10° od kąta prostego (rys. 1).

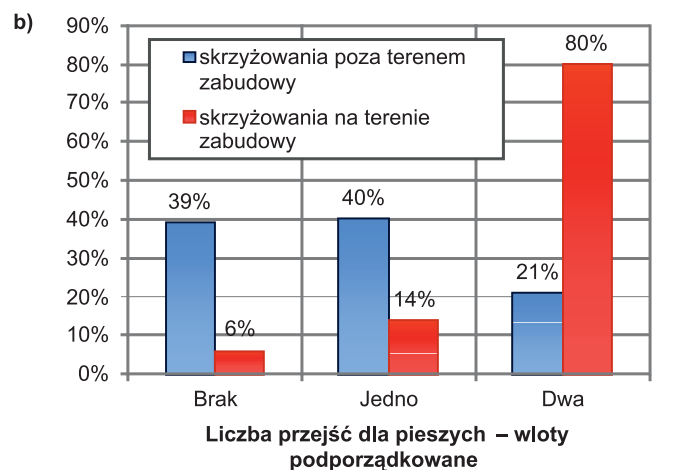
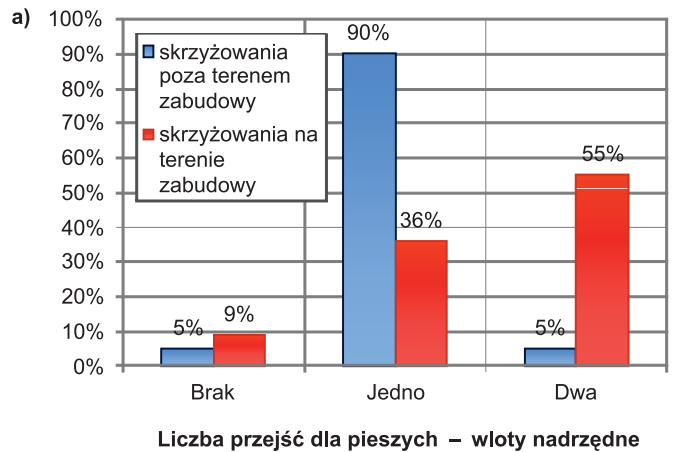


Rys. 1. Porównanie występowania różnych kątów przecięcia osi dróg skrzyżowań zlokalizowanych na i poza terenie zabudowy

- Wszystkie analizowane skrzyżowania były skanalizowane, przy czym znacznie częściej kanalizacja dotyczyła wlotów nadrzędnych. W kanalizacji wlotów podporządkowanych dominuje na skrzyżowaniach poza terenem zabudowy wyspa typu kropla (60% przypadków). Kanalizacja wlotów podporządkowanych za pomocą wysp trójkątnych jest rozwiązaniem stosowanym z podobną częstością zarówno na skrzyżowaniach poza terenem zabudowy, jak i na terenie zabudowy (ok. 24% przypadków).
- Dodatkowy pas do skrętu w lewo na wlotach drogi z pierwszeństwem przejazdu występuje równie często na skrzyżowaniach na terenie zabudowy, jak i poza nim (rys. 2). Poza terenem zabudowy jeden pas na wlocie podporządkowanym jest typowym rozwiązaniem stosowanym na skrzyżowaniach bez sygnalizacji. Rozwiązanie takie zazwyczaj pozostaje po zainstalowaniu sygnalizacji na skrzyżowaniu.
- Na skrzyżowaniach zlokalizowanych poza terenem zabudowy, z uwagi na wyższą prędkość miarodajną, dłuższy



Rys. 2. Częstość występowania dodatkowych pasów ruchu dla relacji skrętnych na skrzyżowaniach zlokalizowanych na i poza terenie zabudowy



Rys. 3. Występowanie przejść dla pieszych na wlotach nadrzędnych (a) i podporządkowanych (b)

jest odcinek zwalniania, a na terenie zabudowy, z uwagi na dłuższe kolejki – odcinek akumulacji.

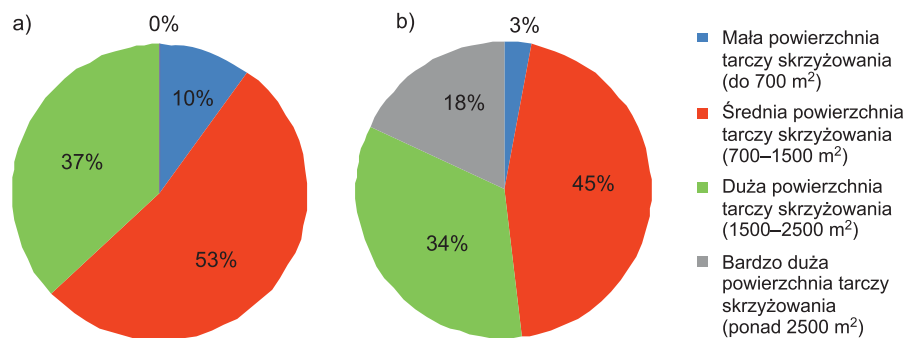
- Chodniki na wlotach nadrzędnych na skrzyżowaniach poza terenem zabudowy związane są, w większości przypadków, z lokalizacją przystanku autobusowego, który zazwyczaj znajduje się na wlotach drogi nadrzędnej.
- Na wlotach nadrzędnych skrzyżowań poza terenem zabudowy dominuje jedno przejście dla pieszych, a na wlotach podporządkowanych równie często jest brak przejścia, jak i występowanie jednego przejścia (rys. 3).

Skrzyżowanie poza terenem zabudowy, na którym występuje tylko jedno przejście dla pieszych na wlotach nadrzędnych, przy jednoczesnym braku przejść na obu wlotach podporządkowanych nie zapewnia pieszym bezpiecznego przejścia przez skrzyżowanie.

- Mniejsze powierzchnie skrzyżowań poza terenem zabudowy (rys. 4) wynikają głównie z braku rozbudowy wlotów podporządkowanych. Nie występuje na nich natomiast przybliżanie linii zatrzymania, związane z brakiem przejść dla pieszych, ze względu na zapewnienie dostrzegalności sygnalizatorów.

Jako specyficzne cechy geometryczne skrzyżowań z sygnalizacją poza terenem zabudowy można wskazać:

- sposób kanalizacji wlotów i geometria stosowanych wysp, zwłaszcza na wlotach podporządkowanych,



Rys. 4. Klasyfikacja skrzyżowań poza terenem zabudowy (a) i na terenie zabudowy (b) pod względem powierzchni ich tarczy

- czynniki decydujące o długości dodatkowych pasów dla relacji skrętnych; poza terenem zabudowy dominującą rolę ma prędkość miarodajna, a w miastach zasięg kolejki miarodajnej,
- znacznie częściej niż na skrzyżowaniach miejskich występują jednopasowe wloty podporządkowane,
- brak lub znacznie mniejszy zakres rozbudowy infrastruktury dla ruchu pieszego i rowerowego,
- wyraźnie mniejsza powierzchnia skrzyżowania,
- mniejsze długości dróg ewakuacji, ale i dojazdu do strefy kolizji,
- w mniejszym stopniu niż w obszarach miejskich ograniczona widoczność,
- wymaganie dotyczące widoczności na zatrzymanie do końca kolejki oraz sygnalizatora przy dojeździe do skrzyżowania [8, 9].

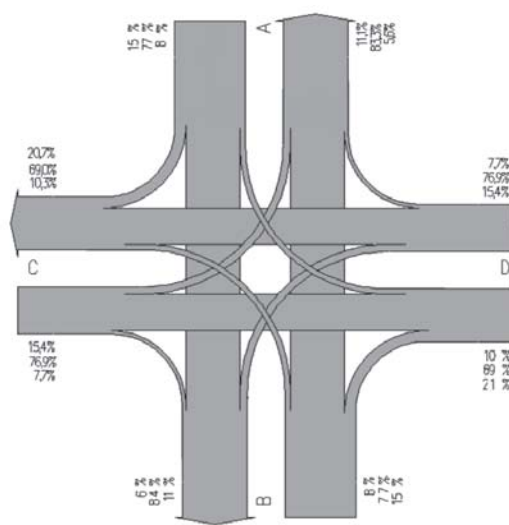
Charakterystyka ruchu

Podstawową charakterystykę ruchu na skrzyżowaniu tworzą przede wszystkim natężenia ruchu i ich cechy, takie jak

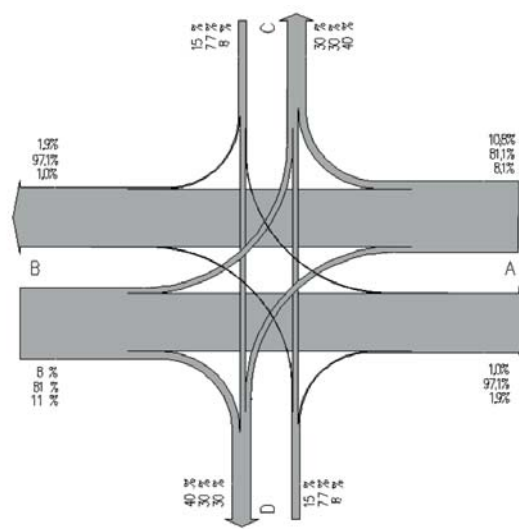
struktura kierunkowa i rodzajowa oraz zmienność w czasie, a ponadto prędkość na dojeździe do skrzyżowania.

Na 24 badanych skrzyżowaniach zidentyfikowano znaczne zróżnicowanie natężenia ruchu. Sumaryczne natężenia na skrzyżowaniu wynosiły od bardzo małego 467 P/h do znacznego 2997 P/h. Z uwagi na proporcje obciążenia ruchem badane skrzyżowania można podzielić na dwa typy. Pierwszy to połączenie dróg o dużym natężeniu ruchu na obu kierunkach (skrzyżowanie dróg krajowych oraz skrzyżowanie drogi krajowej z drogą wojewódzka), drugim typem jest skrzyżowanie drogi krajowej z drogami niższych klas, typ ten charakteryzuje się znacznym zróżnicowaniem natężeń na obu kierunkach. W drugim przypadku dość częstą jest sytuacja, w której natężenie na wlotach bocznych nie przekracza 10% ruchu na skrzyżowaniu. Autorzy nie dociekali, co było powodem instalacji sygnalizacji na tych skrzyżowaniach. Można zaobserwować wyraźne różnice w geometrii skrzyżowań tych dwóch typów pod względem liczby pasów ruchu oraz rodzaju wysp kanalizujących ruch na tarczy skrzyżowania (rys. 5 i 6).

Powszechnie stosowaną charakterystyką, opisującą zakres zmienności natężenia ruchu w godzinie, opartą na 15



Rys. 5. Grafika przedstawiająca typową geometrię skrzyżowania dwóch dróg o dużym obciążeniu ruchem na obu kierunkach (po lewej – źródło „Mapy Google”) oraz kartogram pokazujący typowy rozkład kierunkowy natężeń na skrzyżowaniach tego rodzaju (po prawej)



Rys. 6. Grafika przedstawiająca typową geometrię skrzyżowania dwóch dróg o dużym zróżnicowaniu natężeń na obu kierunkach (po lewej – źródło „Mapy Google”) oraz kartogram pokazujący typowy rozkład kierunkowy natężeń na skrzyżowaniach tego rodzaju (po prawej)

min. wartościach natężenia, jest wskaźnik nierównomierności ruchu k_{15} [4]. Dla analizowanych skrzyżowań wskaźnik ten, z wyjątkiem jednego skrzyżowania [1] przyjmował wartości powyżej 0,90, a jego średnia wartość wyniosła 0,95. W praktycznych analizach, przy braku danych o zmienności ruchu w godzinie, można przyjmować do wyznaczenia natężenia obliczeniowego ($Q_{obl} = Q/k_{15}$) dla skrzyżowań poza terenem zabudowy wartości k_{15} z przedziału 0,92 – 0,98.

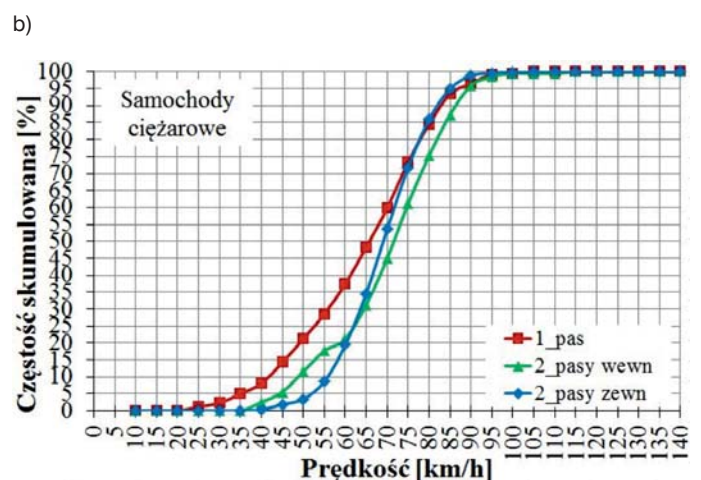
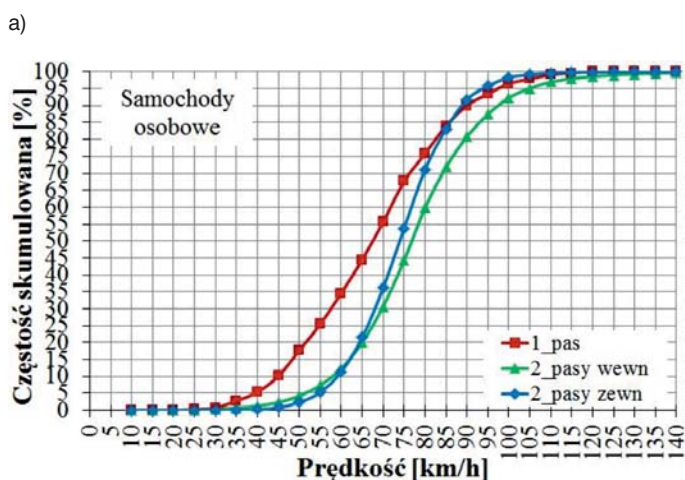
Udział pojazdów ciężkich w ruchu u_c wahał się od 7,7% do 31,0%. Średnia wartość u_c wyniosła ok. 21%. Znaczącą różnicą udziału pojazdów ciężkich na poszczególnych pasach przekrojów dwujezdniowych. Na lewym pasie rzadko u_c przekraczało 15%, podczas gdy na pasie prawym przekraczało i 50%. Przeciętnie na pasie lewym u_c wynosiło 11,4% a na pasie prawym 40,1% [3].

Szczegółowymi badaniami [2, 3] objęto prędkości pojazdów w celu określenia wartości prędkości pojazdów osobowych i ciężarowych, ich zróżnicowania w populacji uczestników ruchu (rys. 8), zmienności na odcinku dojazdowym do skrzyżowania (rys. 9) oraz przy przejeździe skrzyżowania. Umożliwiło to odniesienie rzeczywistych prędkości do obowiązującego na dojeździe do skrzyżowania limitu. Pomiary dotyczyły pojazdów przejeżdżających skrzyżowanie w sposób niezakłócony, czyli praktycznie przejeżdżających linię zatrzymań w czasie sygnału zielonego, już po rozładowaniu kolejki pojazdów. Mogą to być pojazdy jadące swobodnie lub w kolumnie.

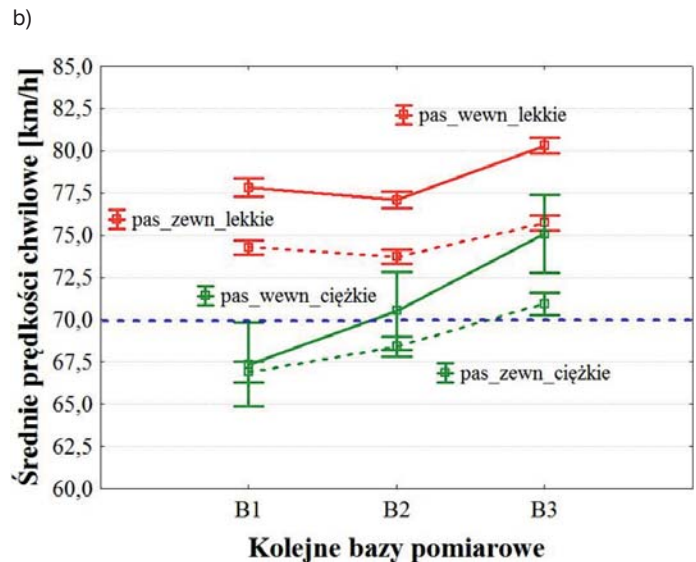
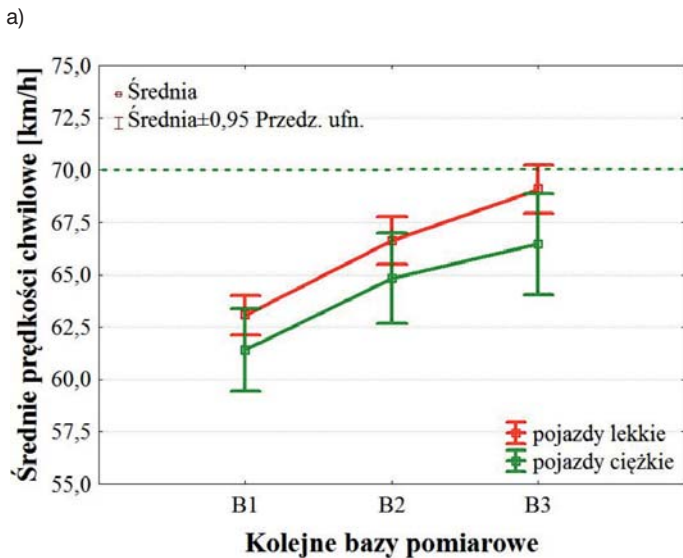
Pomiary prędkości chwilowych pojazdów prowadzono w trzech strefach na wlocie, które oznaczone zostały, jako B1, B2 i B3. Baza B1 zlokalizowana była najdalej od linii zatrzymań w strefie, w której występują początki wysp dzielących lub wydzielonych pasów ruchu. Baza B3 usytuowana była najbliżej skrzyżowania i kończyła się na linii zatrzymań. Baza B2 znajdowała się pomiędzy B1 i B3.

Analizując rozkłady prędkości w ruchu niezakłóconym na wlocie skrzyżowania (rys. 8) można stwierdzić, że:

- na wlotach z jednym pasem dla relacji na wprost prędkość dopuszczalna (70 km/h) przekraczana jest przez ok. 45%



Rys. 8. Dystrubuanaty empiryczne prędkości pojazdów lekkich (a) i ciężkich (b) na pasach ruchu dla relacji na wprost (przekroje 1×2 i 2×2)



Rys. 9. Zmienności prędkości średniej w kolejnych bazach pomiarowych, w grupach pojazdów lekkich i ciężkich na pasach ruchu dla relacji na wprost; a – przekroje 1×2, b – przekroje 2×2

pojazdów lekkich i przez ok. 40% pojazdów ciężkich. Kwantyl 85% prędkości v_{85} (utożsamiany z prędkością miarodajną) w grupach pojazdów lekkich i ciężkich przyjmuje wartości wyższe od prędkości dopuszczalnej odpowiednio o 16 i 10 km/h,

- na wlotach z dwoma pasami dla relacji na wprost dopuszczalną prędkość przekraczają zarówno pojazdy lekkie, jak i ciężkie, odpowiednio ok. 65% i 55% pojazdów, a v_{85} przewyższa prędkość dopuszczalną (70 km/h) na pasie wewnętrznym i zewnętrznym w grupie pojazdów lekkich odpowiednio o 23 km/h i 16 km/h oraz w grupie pojazdów ciężkich o 14 km/h i 10 km/h.

W zakresie zmian prędkości na dojeździe do skrzyżowania (rys. 9) można stwierdzić, że:

- prędkości pojazdów na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną poza terenem zabudowy są największe na pasach wewnętrznych, nieco mniejsze na pasach zewnętrznych przekrojów 2 × 2, a najmniejsze na pasie ruchu przeznaczonym dla relacji na wprost przy przekroju zasadniczym jezdni 1 × 2. Prędkości pojazdów lekkich są zawsze wyższe od prędkości pojazdów ciężkich;
- średnie prędkości pojazdów relacji na wprost dojeżdżających do skrzyżowania podczas sygnału zielonego rosną w miarę zbliżania się do skrzyżowania niezależnie od przekroju drogi. Jest to niewątpliwie powodowane oddziaływaniem sygnału zielonego na pojazdy dojeżdżające do skrzyżowania (chęć przejechania linii zatrzymań przed końcem sygnału zielonego).

Cechy sterowania

O celowości zastosowania sygnalizacji na skrzyżowaniu poza terenem zabudowy najczęściej przesądzają względy bezpieczeństwa; rzadziej względy sprawności ruchu. Przeprowadzone analizy zastosowanych rozwiązań na badanych skrzyżowaniach wykazały, że mimo nieznaczących natężeń na

wlotach bocznych, na skrzyżowaniach z intensywnym ruchem nadrzędnym (zwłaszcza na drodze wielopasowej) instalacja sygnalizacji świetlnej jest zasadna ze względów zarówno bezpieczeństwa, jak i sprawności ruchu. Przejazd przez skrzyżowanie pojazdów z wlotów bocznych byłby okupiony nieakceptowanymi przez kierujących stratami czasu. Na części skrzyżowań warunki ruchu dla wlotów podporządkowanych wypadły bardzo dobre lub dobre (poziom swobody ruchu I lub II), a stopień wykorzystania przepustowości nieznaczny (2–40% [3]). Skrzyżowania te w aspekcie sprawności mogłyby z powodzeniem funkcjonować bez sygnalizacji świetlnej. Według pomocniczego kryterium cząstkowego oceny celowości stosowania sygnalizacji, skrzyżowania te miałyby przyznane 0 punktów ze względu na natężenia ruchu. O potrzebie zainstalowania sygnalizacji przesądziły w tych przypadkach inne względy (w tym brd).

Ustalenie programu sygnalizacji – układu faz podstawowych (realizowanych w stanie ciągłych wzbudzeń detektorów) jest złożonym zagadnieniem, którego celem jest zapewnienie przepustowości i akceptowalnych warunków ruchu. W praktyce projektowej rzadko spotykanym elementem procesu projektowania jest optymalizacja z uwzględnieniem bezpieczeństwa ruchu ze względu na trudności z kwantyfikacją wpływu poszczególnych rozwiązań, w tym konfiguracji systemu detekcji, na zagrożenie bezpieczeństwa ruchu. Ma to szczególne znaczenie przy wysokich prędkościach na dojeździe do skrzyżowania. Na skrzyżowaniach, które objęte były badaniami, w większości przypadków funkcjonowała sygnalizacja z trzema fazami podstawowymi (77% skrzyżowań), z dopuszczeniem kolizyjnego przebiegu strumieni w fazie obsługującej kierunek drugorzędny. Oprócz układu faz podstawowych, stosowane są fazy możliwe, realizowane w zależności od zgłoszeń pojazdów na poszczególnych pasach ruchu oraz pieszych na przejściach. Ponieważ nie istnieją ścisłe wymagania projektowe dotyczące sterowania ruchem na skrzyżowaniu z sygnalizacją, takie elementy projektu jak układ faz, program sygnalizacji, dłu-

gość cyklu, algorytm sterowania zmiennoczasowego, układ detekcji, itp. mogą się znacząco różnić na poszczególnych skrzyżowaniach.

Parametry programu sygnalizacji świetlnej – długości cyklu i sygnałów zielonych, ustala się głównie pod kątem zapewnienia odpowiednich warunków ruchu pojazdów. Na skrzyżowaniach zlokalizowanych poza terenem zabudowy istotne jest znalezienie kompromisu między uprzywilejowaniem ruchu w ciągu drogi krajowej, a potrzebami obsługi pieszych przekraczających drogę krajową (wymagają często długiego sygnału zielonego) oraz niewydłużenia czasu oczekiwania na sygnał zielony w przypadku pojazdów obsługiwanych w pozostałych fazach ruchu. Program maksymalny przygotowany jest dla sytuacji, kiedy wystąpią ciągle wzbudzenia na detektorach we wszystkich grupach sygnałowych. W tym przypadku zasadniczym problemem jest ustalenie natężenia miarodajnego z uwzględnieniem jego zmienności w czasie.

Porównanie obliczeń czasów międzyzielonych na skrzyżowaniach poza terenem zabudowy pokazuje, że metoda obliczeniowa wymagana w kraju prowadzi do przyjmowania krótszych czasów międzyzielonych niż w USA, Niemczech i Francji. W szczególności zauważane są różnice w długości sygnału żółtego. Stała, 3 s długość sygnału żółtego jest niedostosowana do wyższych prędkości pojazdów. Typowe ograniczenie prędkości na dojeździe do skrzyżowania do 70 km/h nie gwarantuje bezpiecznego zatrzymania się pojazdu w ciągu 3 s sygnału żółtego. Jak wykazały analizy, wydłużenie sygnału żółtego do 4 s pozwoliłoby zredukować liczbę wjazdów na skrzyżowanie podczas sygnału czerwonego o 39%. Jeśli uwzględnić sprzężenie zwrotne między długością sygnału żółtego a zachowaniem kierujących, na podstawie badań zagranicznych redukcję liczby wjazdów podczas sygnału czerwonego można oszacować na 33%.

Podsumowanie

Skrzyżowania z sygnalizacją świetlną zlokalizowane poza terenem zabudowy różnią się pod wieloma względami od skrzyżowań w strefach zurbanizowanych. Częściej niż w warunkach miejskich elementy geometryczne skrzyżowań, jak np. dodatkowe pasy ruchu i kanalizacja, wiążą się z funkcją drogi, dostrzegalnością skrzyżowania, płynnością i bezpieczeństwem ruchu niż z potrzebami ruchowymi.

Zdecydowana większość skrzyżowań poza terenem zabudowy zapewnia połączenie dróg krajowych z podporządkowanymi drogami niższych klas. Instalacja sygnalizacji wynika z bardzo długich czasów oczekiwania pojazdów z dróg bocznych (powodowanych przez wysoką prędkość i duże natężenie potoku nadrzędnego), a w efekcie nierzadko wymuszeń i wypadków. Jak wynika z wykonanych analiz, tylko na niektórych skrzyżowaniach udział natężeń na wlotach podporządkowanych jest podobny lub nawet większy niż na wlotach głównych. Wpływ na taki rozkład natężeń na skrzyżowaniu może mieć ich lokalizacja na obwodnicach miast. Rozkład ruchu na pasy w przypadku przekrojów wielopasowych determinowany jest innymi względami niż w warunkach miejskich i wymaga szczególnego uwzględnienia struktury rozdajowej ruchu.

W warunkach krajowych, projektowanie sygnalizacji świetlnej nie ma wyraźnego, jednoznacznego i kompletnego umocowania prawnego, a niektóre zapisy można uznać za kontrowersyjne. Dotyczy to również wymiarowania tak ważnego elementu programu sygnalizacji jakim są czasy międzyzielone (m.in. prędkości ewakuacji i dojazdu, długość sygnału żółtego). Program sygnalizacji zwykle jest ustalany z wyraźną preferencją kierunku głównego, co przy potrzebie obsługi ruchu pieszego wymaga stosowania długich cykli ($T \geq 100$ s, najczęściej 120 s). System detekcji na skrzyżowaniach poza terenem zabudowy ma zazwyczaj większy zasięg niż w przypadku miast (o 30 do 60 m), nie znaleziono jednak przesłanek wiążących dany typ stosowanego układu detektorów z innymi czynnikami geometryczno-ruchowymi skrzyżowania.

Biorąc pod uwagę nakreśloną w artykule specyfikę skrzyżowań z sygnalizacją zlokalizowanych poza terenem zabudowy, a ponadto stwierdzone znaczne różnice w natężeniach nasycenia, stanowiących podstawę obliczeń przepustowości, racjonalne byłoby podjęcie szeroko zakrojonych prac umożliwiających aktualizację i uzupełnienie obecnych wytycznych projektowania skrzyżowań i rozporządzeń dotyczących sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach.

Bibliografia

- [1] J. Chodur: *Charakterystyka natężeń ruchu na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją*, Technika Transportu Szynowego, 9/2012, s. 4629 – 4638 na płycie CD
- [2] J. Chodur, R. Bąk: *Charakterystyki prędkości na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, Drogownictwo Nr 2/2012 str. 48-54
- [3] J. Chodur, M. Tracz, S. Gondek, K. Ostrowski, R. Bąk: *Problemy eksploatacyjne skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na zamiejskich drogach z dużymi prędkościami*, Projekt Badawczy Własny NCN nr N N509 254037, Kraków 2012
- [4] S. Gaca, W. Suchorzewski, M. Tracz: *Inżynieria ruchu drogowego*, WKŁ, Warszawa 2008
- [5] M. Tracz, J. Chodur, S. Gaca i inni: *Wytyczne projektowania skrzyżowań drogowych Część I: Skrzyżowania zwykłe i skanalizowane*, GDDP, Warszawa 2001
- [6] L.A. Rodegerdts, B. Nevers, B. Robinson: *Signalized Intersections: Informational Guide*, U.S. Federal Highway Administration, Report No. FHWA-HRT-04-091, McLean, VA 2004
- [7] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej z dnia 2 marca 1999 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać drogi publiczne i ich usytuowanie. Dz. U. nr 43, poz. 430 z dnia 2 marca 1999 r.
- [8] 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. oraz późniejsze zmiany: Dz. U. nr 67, poz. 413 z 2008 r. i Dz. U. nr 126, poz. 813 z 2008 r.
- [9] *The Geometric Layout of Signal-Controlled Junctions and Signalised Roundabouts*. Design Manual for Roads and Bridges, Volume 6 Road Geometry, Section 2 Junctions, The Highways Agency, Scottish Executive, Welsh Assembly Government, The Department For Regional Development Northern Ireland, TD 50/04, November 2004
- [10] *Vägar och gators utformning (VGU)*. Vägverket, Svenska Kommunförbundet, 2004
- [11] Wolshon B.: *Toolbox on Intersection Safety and Design. Chapter 1 – Geometric Design*. Institute of Transportation Engineers, Federal Highway Administration, Washington, D.C. 2004 ■