

JANUSZ CHODUR

prof.PK, dr hab.inż.,
Politechnika Krakowska, Wydział
Inżynierii Lądowej, 31-155
Kraków, ul. Warszawska 24,
tel.: +48 12 628-23-55,
e-mail: jchodur@pk.edu.pl

KRZYSZTOF OSTROWSKI

dr inż., Politechnika Krakowska,
Wydział Inżynierii Lądowej,
31-155 Kraków, ul. Warszawska
24, tel.: +48 12 628-25-39,
e-mail: kostrowski@pk.edu.pl

CHARAKTERYSTYKA STRUMIENIA RUCHU W POCZĄTKOWYM OKRESIE SYGNAŁU ZIELONEGO NA SKRZYŻOWANIU Z SYGNALIZACJĄ¹

Streszczenie. Podjęte badania miały na celu modelowanie procesu rozładowania kolejki i wjazdu na skrzyżowanie pojazdów w początkowym okresie sygnału zielonego m.in. w celu identyfikacji specyficznych cech funkcjonowania zamiejskich skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Szczegółowymi analizami objęto wjazd na skrzyżowanie pierwszego pojazdu z kolejki w poszczególnych cyklach sygnalizacyjnych oraz odstępy czasu pomiędzy początkowymi pojazdami z kolejki przejeżdżającymi linię zatrzymań z intensywnością istotnie różniącą się od intensywności w środkowym przedziale sygnału zielonego. Najlepszym do opisu zmiennej losowej, jaką są momenty wjazdu pierwszego pojazdu z kolejki, okazał się rozkład Weibulla. Parametry tego rozkładu zależą m.in. od położenia pasa na wlocie, udziału w ruchu pojazdów ciężkich, lokalizacji skrzyżowania (miasto, poza miastem). Na skrzyżowaniach miejskich obserwuje się szybsze ruszanie pojazdów przy zmianie sygnałów, ale i większy udział przedwczesnych wjazdów niż na skrzyżowaniach zamiejskich. Uśredniony udział przedwczesnych wjazdów na skrzyżowaniach miejskich sięga 15%, podczas gdy na skrzyżowaniach zamiejskich 5%. Wcześniejsze wjazdy na skrzyżowanie pojazdów w rozpoczynającej się fazie mogą stanowić zagrożenie bezpieczeństwa ruchu.

Mniejsza intensywność wjazdu na skrzyżowanie pojazdów na początku sygnału zielonego generuje czas tracony istotny w estymacji przepustowości wlotu skrzyżowania. Przeprowadzone analizy regresyjne wpływu czynników drogowo-ruchowych na wielkość czasu traconego, wykazały istotny, choć wyjaśniający w 32%–48% zmienną zależną, wpływ lokalizacji skrzyżowania, momentu wjazdu pierwszego pojazdu, udziału w ruchu pojazdów ciężkich, położenia skrzyżowania oraz odległości linii zatrzymań od sygnalizatora na wysięgniku. Minimalne, chwilowe wartości natężenia nasycenia w cyklach sygnalizacyjnych na skrzyżowaniach zamiejskich przyjmują niższe wartości, nawet o 200 E/h niż na skrzyżowaniach miejskich.

Słowa kluczowe: skrzyżowanie z sygnalizacją, modelowanie ruchu, czas tracony

Wprowadzenie

W analizie sprawności, jak i bezpieczeństwa ruchu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną istotna jest charakterystyka zachowań kierowców przy zmianie sygnałów. Sygnał żółty nadawany razem z sygnałem czerwonym uprzedza kierowców o rozpoczęciu okresu zezwolenia na ruch. Na początku tego okresu pojazdy zazwyczaj ruszają z kolejki, jaka ustawiła się na wlocie skrzyżowania podczas sygnału czerwonego. Moment przejazdu przez linię zatrzymań pierwszego i kolejnych pojazdów zależy potencjalnie od wielu czynników związanych z kierowcą, z samochodem, ze skrzyżowaniem,

z sygnalizacją, z ruchem różnych uczestników i jego warunkami, a także czynnikami atmosferycznymi. Reakcje kierowcy zależą od jego cech psychofizycznych, motywacji podróży oraz czasu oczekiwania na wjazd na skrzyżowanie, a także zachowań poprzednika i warunków atmosferycznych.

Proces rozładowania kolejki determinuje także rodzaj samochodu, jego gabaryty oraz cechy dynamiczne. Proces ten zależy również od geometrii wlotu skrzyżowania i ukształtowania wysokościowego, a także od organizacji ruchu w grupach pasów i w fazach sygnalizacyjnych. Istotny wpływ może mieć też lokalizacja skrzyżowania (tereny miejskie i poza miejskie) oraz dopuszczona prędkość. Wjazdy na skrzyżowanie zależą ponadto od stanu zatłoczenia na skrzyżowaniu oraz rodzaju uczestników w zakończonej i rozpoczynającej się fazie. Mnogość czynników determinujących proces rozładowania kolejki powoduje jego zmienność.

Podjęte badania, współfinansowane ze środków grantu badawczego „Problemy eksploatacyjne skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na drogach krajowych z wysokimi prędkościami” realizowanego w Katedrze Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu Politechniki Krakowskiej, miały na celu m.in. identyfikację tego procesu i wykazanie specyficznych cech funkcjonowania zamiejskich skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Opis wjazdu pojazdów na skrzyżowanie na początku sygnału zielonego znajduje zastosowanie w programowaniu sygnalizacji (czasy międzzielone, czasy tracone) jak również w ocenie sprawności skrzyżowania (przepustowość, straty czasu, kolejki).

Badania empiryczne techniką filmowania ruchu przeprowadzono na 10 wlotach skrzyżowań zlokalizowanych na drogach krajowych województw małopolskiego, śląskiego, łódzkiego, mazowieckiego, opolskiego i świętokrzyskiego. W artykule przedstawiono wyniki tych badań odniesione do wyników wcześniej prowadzonych badań na skrzyżowaniach miejskich [1].

Wjazdy na skrzyżowanie na początku sygnału zielonego

W analizach zarejestrowanych danych wyróżniono odstępy czasu pomiędzy kolejno przejeżdżającymi pojazdami przez linię zatrzymań na pasach przeznaczonych dla relacji na wprost (rys. 1) w trakcie nadawania sygnałów świetlnych: czerwonego z żółtym, zielonego oraz żółtego. Odstępy te wyznaczały momenty przejazdu przez linię zatrzymań tylnych zderzaków kolejnych pojazdów. Wyróżniono także

¹ © Transport Miejski i Regionalny, 2012. Wkład autorów w publikację: J. Chodur – 50%, K. Ostrowski – 50%.

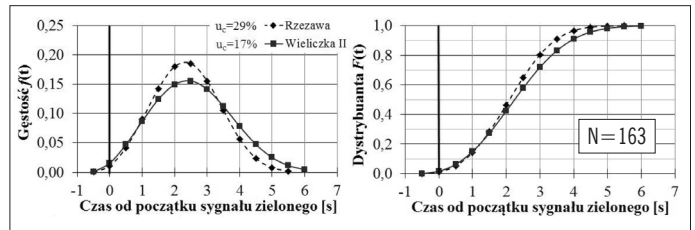


Rys. 1. Linia zatrzymań jako przekrój pomiarowy w badaniach wjazdów na skrzyżowanie.

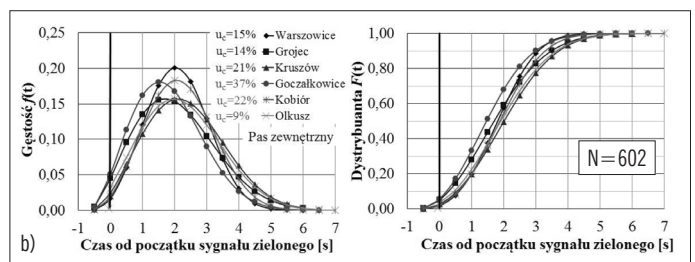
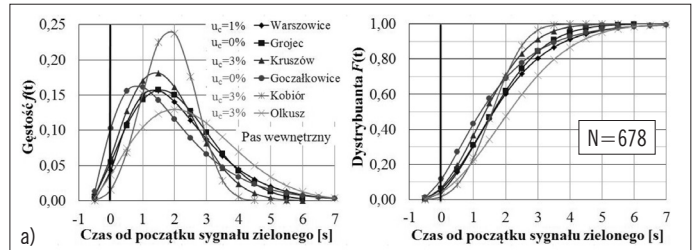
wjazdy pierwszego pojazdu w każdym cyklu określając moment przejazdu linii zatrzymań przez przód pojazdu, licząc od początku sygnału czerwonego z żółtym. Przy takim określeniu wjazdu rejestrowano przypadki wjazdu pojazdów jeszcze przed rozpoczęciem sygnału zielonego, tzw. przedwczesne wjazdy. W badaniach uwzględniano podstawowe rodzaje pojazdów: osobowe, dostawcze, ciężarowe i autobusy oraz ciężarowe z przyczepą.

Momenty przejazdu linii zatrzymań przez pierwszy pojazd z kolejki w danym cyklu są zmienną, której rozkłady dla wlotów zamiejskich skrzyżowań z jednym, dwoma i trzema pasami do jazdy na wprost przedstawiono na rysunkach 2, 3 i 4. Są to teoretyczne rozkłady dopasowane do danych empirycznych z wykorzystaniem testu zgodności Kołmogorowa–Smirnowa (poziom istotności $\alpha = 0,05$). Najlepszymi do opisu analizowanej zmiennej okazały się rozkłady gamma i Weibulla. Przedwczesne wjazdy na skrzyżowanie dotyczą od 2% do 15% samochodów w zależności od skrzyżowania, pasa ruchu na wlocie oraz występującego na nim udziału pojazdów ciężkich w ruchu (podany na rysunkach udział pojazdów ciężkich odnosi się do pojazdów oczekujących na pierwszej pozycji w kolejce na zmianę sygnałów z czerwonego na zielony). Przedwczesne wjazdy mogą powodować zagrożenie bezpieczeństwa ruchu w okresie międzysygnalnym, przy obliczaniu, którego nie uwzględnia się takich zachowań kierowców.

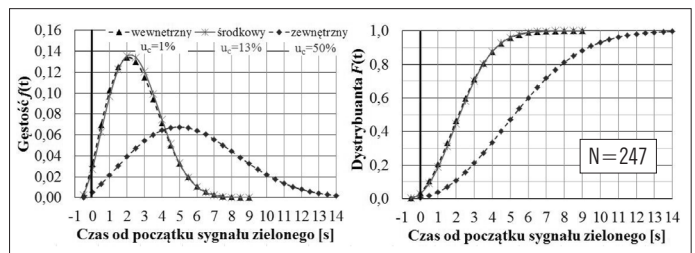
Na wlotach wielopasowych większy udział przedwczesnych wjazdów dotyczy pasa lewego i środkowego. Na pasach tych występuje mniejszy udział pojazdów ciężkich na pierwszej pozycji w kolejce. Przykładowo na wlotach z dwoma pasami do jazdy na wprost (rys. 3) udział pojazdów ciężkich wynosił od 0% do 3% na pasie lewym, a na pasie prawym od 9% do 37% na różnych skrzyżowaniach. Rodzaj pojazdu na pierwszej pozycji w kolejce ma istotny wpływ na moment jego wjazdu na skrzyżowanie i to pomimo tego, że za moment wjazdu uznany został przejazd przodu pojazdu przez linię zatrzymań, a więc nie mają wpływu gabaryty pojazdu. Decydują jego cechy dynamiczne. Jednak zróżnicowanie czasów wjazdu nie zależy wyłącznie od rodzaju pojazdu, ale również od położenia pasa na wlocie. Dobrym tego przykładem jest rozkład czasów wjazdu pokazany na rys. 4, na



Rys. 2. Rozkłady momentów wjazdu pierwszego pojazdu na skrzyżowaniach zamiejskich z jednym pasem do jazdy na wprost



Rys. 3. Rozkłady momentów wjazdu pierwszego pojazdu na skrzyżowaniach zamiejskich z dwoma pasami do jazdy na wprost: a) lewy (wewnętrzny), b) prawy (zewnętrzny)



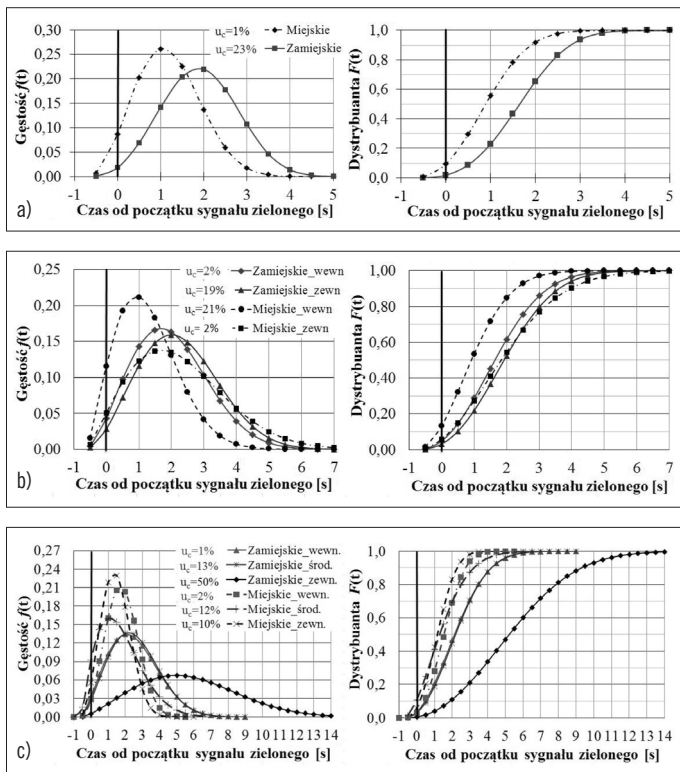
Rys. 4. Rozkłady momentów wjazdu pierwszego pojazdu na skrzyżowaniu zamiejskim z trzema pasami do jazdy na wprost.

którym krzywe dla pasa wewnętrznego (lewego) i środkowego prawie pokrywają się pomimo wyraźnie zróżnicowanego udziału pojazdów ciężkich w ruchu na tych pasach – na wewnętrznym $u_c = 1\%$, a na środkowym $u_c = 13\%$.

Jak pokazują wykresy rozkładów czasu wjazdu pojazdów na skrzyżowanie z wlotów z dwoma pasami do jazdy na wprost (rys. 3), modalna wartość czasu wjazdu wynosi od 0,9 do 2,0 s na pasie lewym oraz od 1,5 do 2,2 s na pasie prawym (zewnętrznym). Zróżnicowanie czasów wjazdów pojazdów na rozważanych pasach wlotu jest również konsekwencją różnych reakcji kierowców na zmianę sygnałów z czerwonego na zielony. Opóźnienie momentu ruszenia i wjazdu na skrzyżowanie skutkuje wzrostem strat czasu pojazdów i zmniejszeniem przepustowości pasa ruchu.

Wcześniej prowadzone badania na skrzyżowaniach miejskich [1, 2] umożliwiły wyznaczenie analogicznych rozkładów wjazdu pojazdów na skrzyżowanie przy zmianie sygnału z czerwonego na zielony. Porównanie uśrednionych krzywych rozkładów wjazdów pojazdów na skrzyżowanie

w warunkach miejskich i zamiejskich [3, 4] przedstawiono na rys. 5. Na skrzyżowaniach miejskich obserwuje się szybsze ruszanie pojazdów przy zmianie sygnałów (średnia wartość momentu wjazdu pierwszego samochodu osobowego – tył pojazdu – wynosi 2,3 s, podczas gdy na skrzyżowaniach zamiejskich 3,5 s, por. rys 12), ale i większy udział przedwczesnych wjazdów niż na skrzyżowaniach zamiejskich. Uśredniony udział przedwczesnych wjazdów na skrzyżowaniach miejskich sięga nawet 15% (rys. 5b), podczas gdy na skrzyżowaniach zamiejskich 5%. Wolniejsze ruszanie na skrzyżowaniach zamiejskich generuje większe straty czasu i spadek przepustowości pasa ruchu w stosunku do skrzyżowań zlokalizowanych w miastach.



Rys. 5. Porównanie uśrednionych rozkładów momentów wjazdu pierwszego pojazdu na skrzyżowaniach zamiejskich i miejskich: a) z jednym pasem do jazdy na wprost, b) z dwoma pasami, c) z trzema pasami.

Formuła na obliczanie czasów międzyzielonych w programie sygnalizacji świetlnej zakłada wjazd pojazdu na skrzyżowanie w rozpoczynającej się fazie w pierwszej sekundzie sygnału zielonego i to pojazdu, który wjeżdża bez zatrzymania (tzw. lotny start). Pojazd ten nie powinien znaleźć się wcześniej w punkcie kolizji, zanim nie przejedzie poza ten punkt pojazd z poprzedniej fazy, który wjechał na skrzyżowanie w ostatniej sekundzie sygnału żółtego. Przy tych założeniach zarówno wcześniejszy wjazd na skrzyżowanie pojazdu w rozpoczynającej się fazie, jak i późniejszy (na sygnale czerwonym) wjazd pojazdu ewakuującego się mogą stanowić zagrożenie bezpieczeństwa ruchu. Rozważane powyżej przedwczesne wjazdy pojazdów dotyczyły jednak pojazdów ruszających z kolejki, które do punktu kolizji docierają później niż pojazdy wjeżdżające z tzw. lotnego startu. Ruszanie pojazdu z kolejki występuje zawsze, gdy na wlocie podczas sygnału czerwonego zatrzymał się chociażby jeden pojazd.

Wjazdy na sygnale czerwonym ewakuujących się pojazdów mogą stanowić większe zagrożenie bezpieczeństwa w okresie międzyzielonym. Ich częstotliwość zależy m.in. od stopnia obciążenia, a zwłaszcza przeciążenia wlotu. Wtedy jednak tworzą się kolejki, które wpływają na opóźnienie czasu dojazdu do punktu kolizji w stosunku do obliczonego. Następuje kompensacja czynników ryzyka, przy założeniu, że przeciążenie dotyczy następujących po sobie faz ruchu. Bardziej niebezpieczna jest sytuacja, w której jeden z kierunków jest przeciążony, a kolizyjny do niego strumień jest niedociążony ruchem. Występują wówczas sytuacje, w których w fazie przeciążonej ruchem obecne są przedwczesne wjazdy ze startu zatrzymanego i niedozwolone przejazdy na sygnale czerwonym, a w kolejnej fazie o małym obciążeniu ruchem, w chwili zapalenia się sygnału zielonego, wjazdy pojazdów ze startu lotnego. W takiej sytuacji dochodzi do niebezpiecznego skrócenia obliczonego czasu międzyzielonego, który zgodnie z [5] może przyjmować wartość minimalną wynoszącą nawet 0 s. Z powyższych rozważań i przeprowadzonym badaniami wynika, że minimalna długość czasu międzyzielonego powinna zależeć od lokalizacji skrzyżowania i sytuacji ruchowej występującej w poszczególnych fazach ruchu.

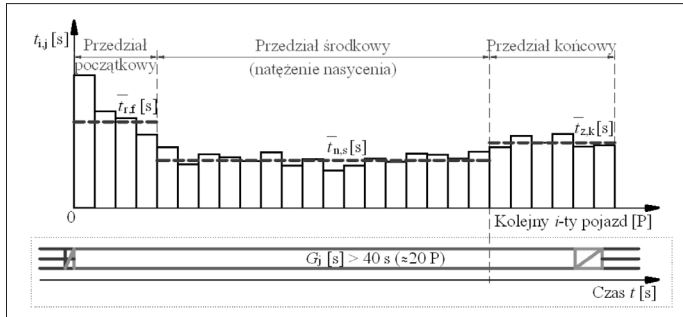
Czas tracony na początku sygnału zielonego

Kolejno ruszające pojazdy w kolejce oddziałują na siebie, wymuszając określone zachowania. Z obserwacji ruchu wynika, że w określonych warunkach zewnętrznych kierujący zjeżdżają ze skrzyżowania szybciej lub wolniej. O tym, jaka będzie intensywność przejazdu pojazdów przez linię zatrzymań w przedziale środkowym sygnału zielonego (rys. 6), decydują m.in. zachowania pierwszych pojazdów ruszających z kolejki. Kierujący pierwszymi pojazdami nieświadomie wymuszają określone zachowania na kolejnych kierujących jadących z tyłu. Analizując zjazdy na linii zatrzymań, zauważono, że pierwsze pojazdy po przejechaniu linii zatrzymań, chcąc osiągnąć wyższe prędkości jazdy, dłużej przyspieszają, pozostawiając za sobą większe luki, przez co w mniejszy sposób oddziałują na kolejnych kierujących, pozostawiając im większą swobodę w doborze prędkości jazdy. Kierujący w korzystnych warunkach mają możliwości osiągania większych prędkości zjazdu ze skrzyżowania, ale potrzebują więcej czasu na osiągnięcie granicznie małych odstępów czasu (odstępów nasycenia) między pojazdami, które utożsamiane są z wysoką intensywnością ruchu w przedziale środkowym sygnału zielonego. Analiza przejazdów przez linię zatrzymań w początkowym okresie sygnału zielonego zazwyczaj ma na celu ustalenie wielkości odstępów czasu między pojazdami z początku kolejki ($\overline{t_{r,f}}$) i porównanie ich z ustabilizowanymi odstępami w dalszej części sygnału zielonego ($\overline{t_{n,s}}$). Umożliwia to określenie czasu traconego przez pojazdy na początku sygnału zielonego:

$$\overline{t_{st}} = \overline{t_{r,f}} - \overline{t_{n,s}} \text{ [s]} \quad (1)$$

gdzie:

- t_{st} [s] – średni czas tracony w przedziale początkowym,
- $t_{r,f}$ [s] – średni odstęp między f pojazdami w przedziale początkowym sygnału zielonego,
- $t_{n,s}$ [s] – średni odstęp nasycenia w przedziale środkowym.



Rys. 6. Ilustracja graficzna zależności odstępów czasu między pojazdami od i -tej pozycji pojazdu w j -tym cyklu sygnalizacyjnym.

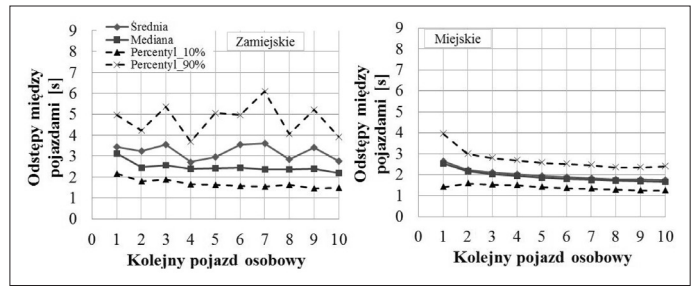
Liczba f pojazdów w początkowym okresie sygnału zielonego, których odstępów różnią się istotnie w sensie statystycznym od odstępów w środkowym przedziale sygnału zielonego jest zmienna na różnych skrzyżowaniach, pasach ruchu na wlocie oraz w różnych warunkach ruchu. Sposoby jej określania podają prace [1, 6].

W niniejszej publikacji skupiono się na charakterystyce odstępów między początkowymi pojazdami na skrzyżowaniach zamiejskich oraz porównaniu ich z odstępami na skrzyżowaniach miejskich. Ewentualne różnice wielkości odstępów mogą znamionować wpływ położenia skrzyżowania oraz specyficznych cech ruchu na skrzyżowaniach miejskich i zamiejskich.

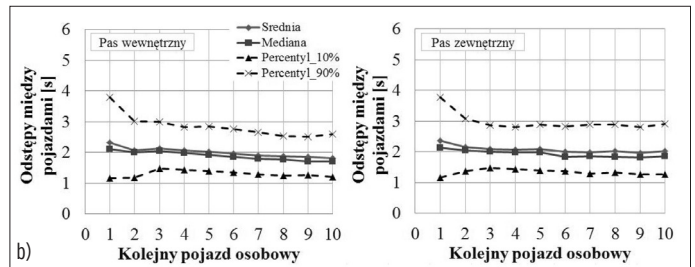
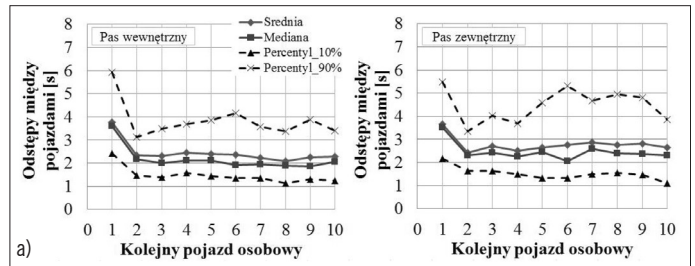
Kolejne wykresy (rys. 7 i 8) pokazują średnie i medialne odstępów oraz 10% i 90% percentyle odstępów między samochodami osobowymi przejeżdżającymi linię zatrzymań z początkowych 10 pozycji w kolejce na skrzyżowaniach zamiejskich i miejskich. W przypadku pierwszego pojazdu jest to moment przejazdu tylnego zderzaka pojazdu przez linię zatrzymań liczony od początku sygnału czerwonego z żółtym.

Widoczne są różnice wielkości, jak i charakterystyk statystycznych odstępów między pojazdami na skrzyżowaniach zamiejskich i miejskich. Wyraźne różnice pomiędzy średnimi i medialnymi wartościami odstępów na skrzyżowaniach zamiejskich wskazują na asymetryczność rozkładów zmiennych, jakimi są odstępów czasu między parami samochodów osobowych. Charakterystyczne są również większe przedziały zmienności (różnice między percentylami 10% i 90%) odstępów na skrzyżowaniach zamiejskich.

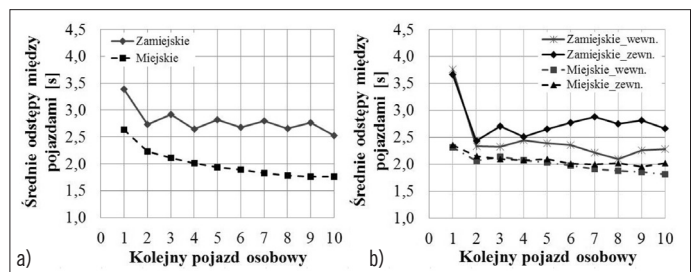
Sugestywne jest zestawienie średnich odstępów między pojazdami na skrzyżowaniach zamiejskich i miejskich na rys 9. Większe odstępów między pojazdami przejeżdżającymi linię zatrzymań na skrzyżowaniach zamiejskich w początkowym okresie sygnału zielonego generują większy czas tracony i niższą przepustowość pasów ruchu. Większy rozrzut odstępów (rys. 7 i 8) znamionuje większą zmienność warunków ruchu na skrzyżowaniach zamiejskich.



Rys. 7. Odstępy czasu na linii zatrzymań między pojazdami osobowymi z kolejki na wlocach z jednym pasem do ruchu na wprost skrzyżowań zamiejskich i miejskich.



Rys. 8. Odstępy czasu na linii zatrzymań między pojazdami osobowymi z kolejki na wlocach z dwoma pasami do ruchu na wprost skrzyżowań zamiejskich (a) i miejskich (b).



Rys. 9. Porównanie średnich odstępów czasu na linii zatrzymań między pojazdami osobowymi z kolejki na wlocach zamiejskich i miejskich skrzyżowań z jednym pasem do jazdy na wprost (a) i z dwoma pasami do jazdy na wprost (b).

Na skrzyżowaniach zamiejskich obserwuje się niespotykany w warunkach miejskich wzrost wielkości odstępów samochodów osobowych wjeżdżających z dalszych pozycji w kolejce w stosunku do początkowych na pasie zewnętrznym (rys. 8a oraz 9b). Może to wynikać z większych odległości w jakich pojazdy ustawiają się w kolejce, a w konsekwencji realizujących przejazd linii zatrzymań z większym odstępem czasowym za poprzednikiem, często pojazdem ciężarowym. W warunkach miejskich szybkie ruszanie po zmianie sygnałów świetlnych oraz podążanie za poprzednikiem w małym odstępem spowodowane jest często występującą na skrzyżowaniach kongestią jak również gęstą siecią skrzyżowań i koniecznością częstych zatrzymań.

Dla identyfikacji czynników determinujących moment wjazdu na skrzyżowanie pierwszego pojazdu z kolejki oraz cza-

su traconego na początku sygnału zielonego przeprowadzono analizę regresji wielorakiej z wykorzystaniem programu STATISTICA. Podane poniżej wzory zawierają zmienne niezależne, istotne statystycznie na poziomie istotności $\alpha=0,05$, objaśniające zmienną zależną tj. odstęp czasowy pierwszego pojazdu t_1 (2) oraz czas tracony na początku sygnału zielonego t_{st} (3 i 4). Na rys. 10, 11 i 12 przedstawiono zależności ilustrujące rozrzut wartości obserwowanych względem przewidywanych z modeli 2, 3 i 4 dla skrzyżowań miejskich i zamiejskich.

Czas przejazdu pierwszego pojazdu przez linię zatrzymań po zapaleniu się sygnału czerwonego z żółtym określa następujący wzór:

$$t_1 = 2,93 \cdot \text{rodz}_0_1 - 0,81 \cdot \text{lok}_0_1 - 0,01 \cdot o_{lz_lk} + 1,26 \cdot G/T + 3,04 \quad (2)$$

$$R = 0,57, R^2 = 0,32, \text{ błąd estym.} = 1,31s$$

Model szacowania czasu traconego na początku sygnału zielonego przy analizie prowadzonej wyłącznie dla par pojazdów osobowo osobowych w przedziale początkowym, podaje poniższy wzór:

$$t_{st,os} = 0,82 \cdot t_{1,os} + 0,73 \cdot \text{lok}_0_1 + 0,09 \cdot o_{syg_lz} + 0,28 \cdot l_{odrz} - 3,10 \quad (3)$$

$$R = 0,70, R^2 = 0,48, \text{ błąd estym.} = 1,11s$$

Przy analizie prowadzonej z uwzględnieniem zarówno pojazdów lekkich, jak i ciężkich, czas tracony na początku sygnału zielonego, wyraża następujący model:

$$t_{st,sc} = -3,34 \cdot u_c + 0,90 \cdot t_1 + 0,57 \cdot \text{poł}_0_1 - 0,85 \quad (4)$$

$$R = 0,62, R^2 = 0,39, \text{ błąd estym.} = 1,82s$$

gdzie:

$t_{1,os}$ – odstęp czasowy pierwszego pojazdu, pomiędzy początkiem sygnału czerwonego z żółtym a momentem przejazdu pojazdu osobowego przez linię zatrzymań (tył pojazdu),

t_1 – odstęp czasowy pierwszego pojazdu, pomiędzy początkiem sygnału czerwonego z żółtym a momentem przejazdu pojazdu przez linię zatrzymań (tył pojazdu),

lok_0_1 – zmienna jakościowa, definiująca lokalizację skrzyżowania. Wartość „0” oznacza lokalizację zamiejską, a „1” miejską,

o_{syg_lz} – odległość linii zatrzymań od sygnalizatora na wysięgniku lub bramie,

l_{odrz} – liczba początkowych pojazdów, których odstępy różnią się istotnie od odstępów w środkowym przedziale sygnału zielonego,

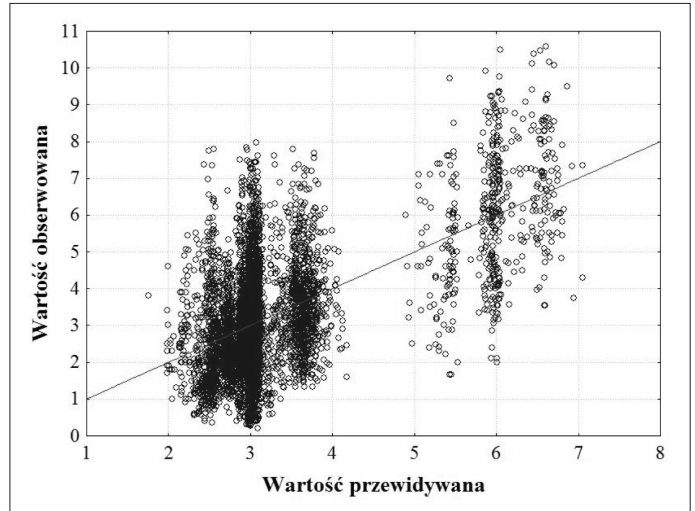
u_c – udział pojazdów ciężkich przejeżdżających przez linię zatrzymań w cyklu sygnalizacyjnym,

poł_0_1 – zmienna jakościowa, definiująca położenie pasa z relacją na wprost na wlocie skrzyżowania. Wartość „0” oznacza pas zewnętrzny, a „1” wewnętrzny,

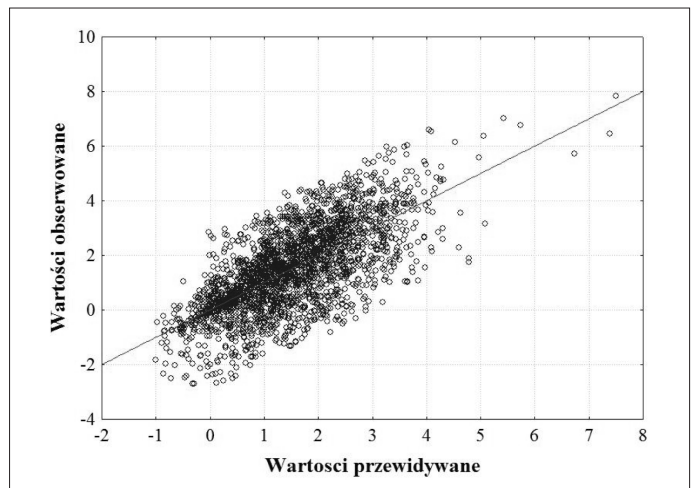
rodz_0_1 – zmienna jakościowa, definiująca rodzaj pojazdu na pierwszym stanowisku w kolejce. Wartość „0” oznacza pojazdy osobowe i dostawcze, a „1” pojazdy ciężkie,

o_{lz_lk} – odległość linii zatrzymań od linii krawężnikowej,

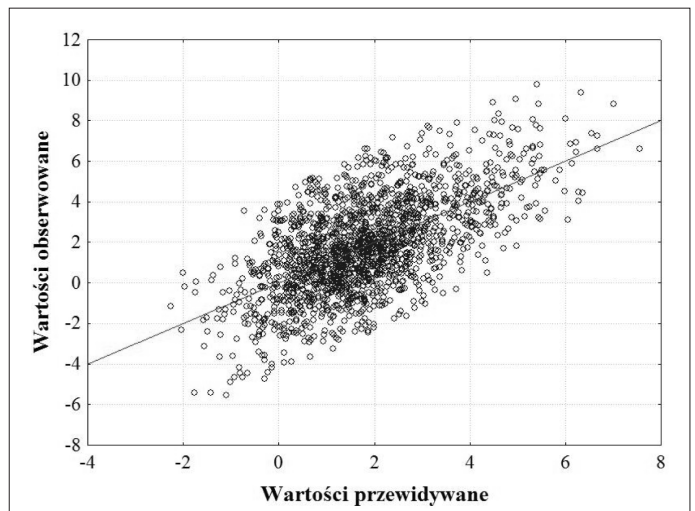
G/T – udział sygnału zielonego w cyklu sygnalizacyjnym.



Rys. 10. Zależność wartości obserwowanych od przewidywanych czasów traconych na początku sygnału zielonego z modelu, wg wzoru 2.



Rys. 11. Zależność wartości obserwowanych od przewidywanych czasów traconych na początku sygnału zielonego z modelu, wg wzoru 3.



Rys. 12. Zależność wartości obserwowanych od przewidywanych czasów traconych na początku sygnału zielonego z modelu, wg wzoru 4.

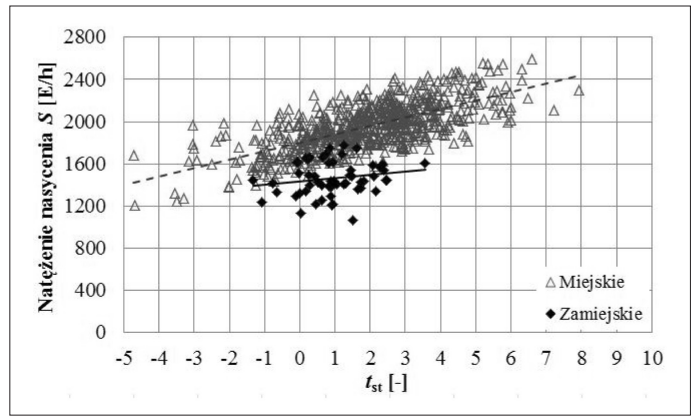
Jak pokazują modele (2) – (4) ujęte w nich czynniki tylko w 32%–48% wyjaśniają szacowany parametr t_1 lub t_{st} . Znaczącą rolę odgrywa niewątpliwie czynnik ludzki – trudne do skwantyfikowania zachowania kierowców.

Przepustowość pasa ruchu zależy od intensywności przejazdu pojazdów przez linię zatrzymań przy rozładowaniu kolejki na tyle długiej, że zjazdy z niej trwają przez cały sygnał zielony. O intensywności przejazdu decydują odstępy czasu między pojazdami na linii zatrzymań. Najczęściej tę intensywność, zwaną natężeniem nasycenia, określa się na podstawie średniej wartości odstępów czasu między pojazdami w środkowym przedziale sygnału zielonego (rys. 6). Ma ona wraz z udziałem sygnału zielonego efektywnego w cyklu sygnalizacyjnym podstawowe znaczenie przy obliczaniu przepustowości pasa ruchu. Długość sygnału zielonego efektywnego zależy m.in. od czasu traconego przez pierwsze pojazdy z kolejki, w sytuacji gdy odstępy między nimi są większe niż między pojazdami w środkowym przedziale sygnału zielonego. Występują też sytuacje, w których czoło kolejki rusza szybciej niż pojazdy z dalszych pozycji, a wtedy zgodnie ze wzorem (1) czas tracony na początku sygnału zielonego przyjmuje wartości ujemne w niektórych cyklach sygnalizacyjnych. Jak wykazały analizy regresyjne [1, 7], czas tracony t_{st} na początku sygnału zielonego jest istotną zmienną objaśniającą w modelu natężenia nasycenia. Zależność natężenia nasycenia S od czasu traconego t_{st} pokazano na rys. 13 i 14. Punkt na wykresie ilustruje natężenie nasycenia w pojedynczym cyklu sygnalizacyjnym. Na wykresach zestawiono przedmiotowe zależności pochodzące ze skrzyżowań o zbliżonych cechach (średnia rozległość skrzyżowania) i uzyskane przy korzystnych warunkach pogodowych. Wyróżniono skrzyżowania z jednym (rys. 13) oraz dwoma pasami (rys. 14) przeznaczonymi do jazdy na wprost na wlocie. W każdym przypadku skrzyżowania zamiejskie charakteryzują się niższymi wartościami natężeń nasycenia. Warto zwrócić uwagę na niskie wartości natężenia nasycenia w niektórych cyklach sygnalizacyjnych na tych skrzyżowaniach, ok. 1000 samochodów osobowych na godzinę sygnału zielonego, podczas gdy na skrzyżowaniach miejskich przyjmują wartości powyżej 1200 E/h. Występujące różnice w całym zbiorze wyników wskazują na celowość specjalnego traktowania skrzyżowań zamiejskich i ostrożnego stosowania metod obliczeniowych [8, 9] w analizie sprawności tych skrzyżowań.

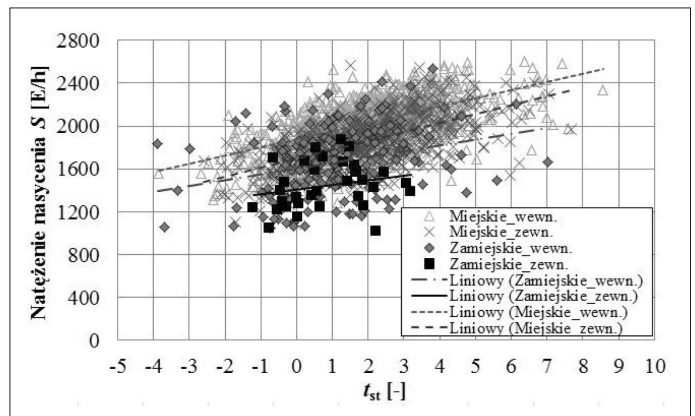
Badania prowadzone na skrzyżowaniach miejskich [1, 7] wykazały ponadto istotny wpływ warunków pogodowych, zwłaszcza długotrwałego opadu deszczu na zachowania kierowców przy wjeździe na skrzyżowanie (rys. 15). Przekłada się to na natężenie nasycenia na pasie ruchu (rys. 16). Słusznym byłoby zatem szacowanie natężeń nasycenia z rozróżnieniem grup warunków pogodowych: opad długotrwały deszczu i pozostałe warunki pogodowe.

Wnioski

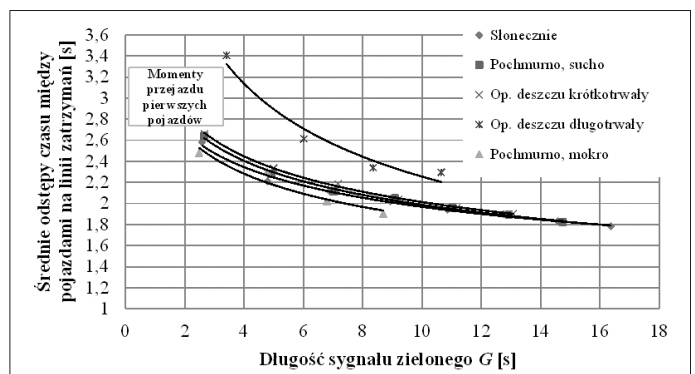
Szczegółowa analiza i modelowanie ruchu na wlotach skrzyżowań w poszczególnych przedziałach fazy ruchu w cyklu sygnalizacyjnym umożliwi wyznaczenie ważnych



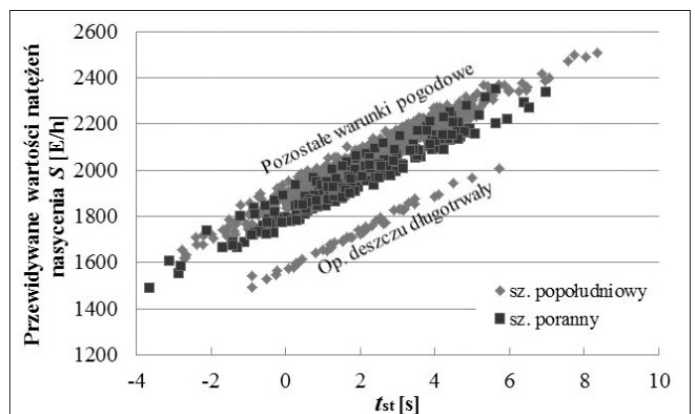
Rys. 13. Zależność natężenia nasycenia od czasu traconego (sprawności ruszania pojazdów) na początku sygnału zielonego na wlotach skrzyżowań z jednym pasem do jazdy na wprost.



Rys. 14. Zależność natężenia nasycenia od czasu traconego (sprawności ruszania pojazdów) na początku sygnału zielonego na wlotach skrzyżowań z dwoma pasami do jazdy na wprost.



Rys. 15. Wpływ warunków pogodowych na odstępy czasu między pojazdami w początkowym okresie sygnału zielonego na jednopasowym wlocie skrzyżowania miejskiego.



Rys. 16. Wpływ warunków pogodowych na natężenie nasycenia S na jednopasowym wlocie skrzyżowania miejskiego.

cech drogowo-ruchowych determinujących sprawność skrzyżowań. W związku z coraz częstszym stosowaniem sygnalizacji świetlnej na skrzyżowaniach dróg zamiejskich, zwłaszcza w sieci dróg krajowych, znaczenia nabiera ocena funkcjonowania tych skrzyżowań i wskazanie istotnych różnic w stosunku do skrzyżowań miejskich.

Badania zrealizowane na skrzyżowaniach miejskich i zamiejskich oraz analizy porównawcze wjazdu pojazdów w początkowym okresie sygnału zielonego pozwalają na następujące stwierdzenia:

- Momenty przejazdu linii zatrzymań przez pierwszy z kolejki pojazd w cyklu sygnalizacyjnym mogą być modelowane rozkładami gamma i Weibulla w przedziale od $-1,0$ s do $+14$ s względem początku sygnału zielonego na skrzyżowaniach zamiejskich i od $-1,0$ s do $+7$ s na skrzyżowaniach miejskich. Znaczne opóźnienie wjazdu na skrzyżowanie po rozpoczęciu sygnału zielonego pojawia się na skrzyżowaniach zamiejskich głównie na pasie zewnętrznym (prawym), na którym zazwyczaj występuje znaczny udział pojazdów ciężkich (nawet ok. 50%);
- Najczęściej pierwszy pojazd przejeżdża linię zatrzymań (przód pojazdu) w przedziale od 0,9 s do 2,0 s po rozpoczęciu sygnału zielonego na pasie lewym oraz od 1,5 s do 2,2 s na pasie prawym wlotów skrzyżowań zamiejskich, lecz występują również wjazdy jeszcze przed rozpoczęciem sygnału zielonego. Różnicowanie czasów wjazdu nie zależy wyłącznie od rodzaju pojazdu, ale również od położenia pasa na wlocie;
- Na skrzyżowaniach miejskich obserwuje się szybsze ruszanie pojazdów przy zmianie sygnałów (średnia wartość momentu wjazdu pierwszego samochodu osobowego – tył pojazdu – wynosi 2,3 s podczas gdy na skrzyżowaniach zamiejskich 3,5 s), ale i większy udział przedwczesnych wjazdów (średnio 15%) niż na skrzyżowaniach zamiejskich (średnio 5%);
- Przedwczesne wjazdy na skrzyżowanie pojazdów z kolejki w rozpoczynającej się fazie nie powodują zazwyczaj zagrożenia bezpieczeństwa z uwagi na wydłużony czas dojazdu do punktu kolizji w stosunku do czasu obliczonego przy założeniu lotnego wjazdu pojazdu na skrzyżowanie;
- W sytuacji, gdy w kolejno następujących po sobie fazach ruchu jedna jest przeciążona ruchem, a kolejna niedociążona, dochodzi do niebezpiecznego skrócenia obliczonego czasu międzyzielonego. Z przeprowadzonych badań wynika, że minimalna długość czasu międzyzielonego powinna zależeć od lokalizacji skrzyżowania i sytuacji ruchowej występującej w poszczególnych fazach ruchu;
- Większe odstępy między pojazdami przejeżdżającymi linię zatrzymań na skrzyżowaniach zamiejskich w początkowym okresie sygnału zielonego generują większy czas tracony i niższą przepustowość pasów ruchu;

- Chwilowe, najniższe wartości natężenia nasycenia w cyklach sygnalizacyjnych na skrzyżowaniach zamiejskich wynoszą ok. 1000 samochodów osobowych na godzinę sygnału zielonego, podczas gdy na skrzyżowaniach miejskich nie spadają poniżej 1200 E/h.

W artykule przedstawiono szczegółowe badania w odniesieniu do cykli sygnalizacyjnych. Zazwyczaj w literaturze spotkać można opisy, w których przedstawia się zróżnicowanie badanych wielkości, w tym natężeń nasycenia, w odniesieniu do godziny. Przykładowo prace [10, 11] przedstawiają wpływ wielkości miasta i położenia pasa ruchu.

Warto zwrócić uwagę na problem nadmiernej prędkości na wlotach zamiejskich skrzyżowań z sygnalizacją [12] i jej charakterystykę rzutującą z jednej strony na kształtowanie geometrii wlotu i dobór parametrów sterowania, a drugiej zachowania uczestników ruchu, w tym decyzje podejmowane przy zmianie sygnałów.

Specyfika funkcjonowania zamiejskich skrzyżowań z sygnalizacją powinna skłonić do dalszych badań zmierzających do opracowania zasad projektowania tych skrzyżowań wraz z procedurami wymiarowania.

Literatura

1. Ostrowski K., *Niezawodność funkcjonowania skrzyżowania z sygnalizacją z uwzględnieniem zmienności natężeń nasycenia*, praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2010.
2. Chodur J., Ostrowski K., *Odstępy czasu między pojazdami przejeżdżającymi linię zatrzymań na sygnale zielonym*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2005, nr 12.
3. Mądro A., Zołna A., *Badanie natężeń nasycenia wlotów w relacji na wprost na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, praca dyplomowa, Politechnika Krakowska, Kraków 2011.
4. Ostrowski K., *Analiza zachowań kierujących pojazdami w stacjach nasycenia ruchem na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, VIII Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna Logitrans 2011, „Logistyka”, 2011, nr 3.
5. *Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych i warunki ich umieszczania na drogach*, Załącznik nr 3 do rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3.07.2003 r. Dz. U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23.12.2003 r.
6. Ostrowski K., *Zmienność natężeń nasycenia relacji na wprost na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, 56. Konferencja Naukowa, Krynica 2010.
7. Chodur J., Ostrowski K., Tracz M., *Impact of saturation flow changes on performance of traffic lanes at signalised intersections*, 6th International Symposium on Highway Capacity and Quality of Service, Stockholm 2011.
8. Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S., Kieć M., Ostrowski K., *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, Warszawa 2004.
9. *Canadian capacity guide for signalized intersections*, red. Tepley S., The Institute of Transportation Engineers, Canada 2008.
10. Perez-Cartagena R.I., Tarko A.P., *Calibration of capacity parameters for signalized intersections in Indiana*, TRB 2005.
11. Bonneson J.A., Nevers B., Pratt M.P., Bonyani G., *Influence of area population, number of lanes and speed limits on saturation flow rate*, TRB 2006.
12. Bąk R., Chodur J., *Charakterystyki prędkości na zamiejskich skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, „Drognictwo”, 2012, nr 2.