

Krzysztof OSTROWSKI¹

**ANALIZA ZACHOWAŃ KIERUJĄCYCH POJAZDAMI W STANACH
NASYCENIA RUCHEM NA WŁOTACH SKRZYŻOWAŃ
Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA**

W artykule przedstawiono wpływ przeciążeń ruchowych na zachowania kierujących pojazdami oraz bezpieczeństwo ruchu. Wyniki analiz bazują na badaniach empirycznych wykonanych w latach 2007 ÷ 2009 na pasach z relacją na wprost na 11 skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną zlokalizowanych w Krakowie. Analiza zachowań kierujących przeprowadzona została oddzielnie dla sygnału czerwonego z żółtym, sygnału zielonego oraz sygnału żółtego i początkowego fragmentu sygnału czerwonego. Ukazano wpływ warunków pogodowych na zachowania kierujących pojazdami oraz opisano reakcje kierujących na zapalenie się sygnału żółtego oraz czerwonego. W końcowej części artykułu zapisano wnioski wynikające z analiz wpływu tych zachowań na bezpieczeństwo ruchu.

**ANALYSIS OF DRIVERS' BEHAVIOUR IN CONGESTIONS STATES AT ENTRY
LANES TO SIGNALISED INTERSECTIONS**

The paper presents the impact of congestion on drivers' behaviour and road traffic safety. The results of analysis have been derived from empirical research conducted in 2007-2009 on straight movement lanes at 11 signalised intersections in Krakow. Analysis of drivers' behaviour was conducted separately for red and yellow signals on the one hand and green, yellow and initial part of red signals on the other. The author shows the impact of weather conditions on drivers' behaviour and describes their response to the activation of the yellow and red signals. The paper concludes with findings stemming from analyses of the impact of such behaviour on road traffic safety.

1. WPROWADZENIE

Rozwój motoryzacji i ruchliwości mieszkańców oraz zachodzące procesy urbanizacyjne powodują znaczny wzrost natężeń ruchu w arteriach miejskich, za którymi nie nadąża rozwój infrastruktury drogowej. Wskutek ograniczeń terenowych wynikających z istniejącej, gęstej, a często także zabytkowej zabudowy ulic jakość odbywanych podróży w mieście ulega pogorszeniu, a kierujący dość często zmuszeni są do akceptacji złych warunków ruchowych i długotrwałych przeciążeń ruchem występujących najczęściej przy dojeździe do skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. W szczytach ruchowych, w stanach

¹kostrowski@pk.edu.pl, Politechnika Krakowska

nasylenia ruchem, gdy kolejki na wlotach skrzyżowań są znaczne, a kierujący są znużeni oczekiwaniem na zjazd, obserwuje się, specyficzne zachowania kierujących pojazdami. Najczęstsze oznaki i zachowania to:

- frustracja kierujących stopniowo łączona z próbami dostosowania się do zaistniałych warunków ruchowych,
- ciągłe poszukiwania alternatywnej trasy przejazdu,
- część kierujących wybiera dłuższą drogę przejazdu niż oczekiwanie w korku,
- inni zmieniają nawyki w odniesieniu do godzin podróży lub rezygnują z jazdy samochodem na rzecz środków komunikacji zbiorowej.

Uciążliwość przejazdu przez miasto w stanach zatłoczenia ruchowego powoduje, że kierujący pojazdami oczekujący dłuższy czas w kolejce na wlocie chcą jak najszybciej zjechać ze skrzyżowania podejmują ryzykowne decyzje w odniesieniu do wyświetlanych sygnałów świetlnych. Takie zachowania mogą powodować powstawanie kolizji i wypadków drogowych. Celem artykułu jest ukazanie wpływu przeciążeń ruchowych na zachowania kierujących pojazdami oraz bezpieczeństwo ruchu drogowego. W artykule przedstawione zostaną wyniki badań dla okresu czasu trwania sygnału czerwonego z żółtym, sygnału zielonego oraz sygnału żółtego i początkowego fragmentu sygnału czerwonego.

2. CHARAKTERYSTYKA BADAŃ EMPIRYCZNYCH

Badania empiryczne wykonywano na wybranych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną prowadzących relacje na wprost w grupach jedno- i wielopasowych (2, 3 pasy) w szczycie popołudniowym w Krakowie. Badania prowadzono dla każdego pasa ruchu oddzielnie w różnych grupach warunków pogodowych.

Pomiary ruchu polegały na rejestracji odstępów czasu pomiędzy tylnymi zderzakami kolejno przejeżdżających pojazdów przez linię zatrzymań w trakcie nadawania sygnałów świetlnych: czerwonego z żółtym, zielonego oraz żółtego na pasach przeznaczonych dla relacji na wprost. Rejestrowano również przedwczesne wjazdy przodów pierwszych pojazdów na sygnale czerwonym z żółtym oraz zjazdu na sygnale czerwonym. W badaniach uwzględniono strukturę rodzajową ruchu w której wyróżniono pojazdy: osobowe, dostawcze, ciężarowe i autobusy oraz ciężarowe z przyczepą. W rejestracji wykorzystano przyciskowe urządzenia mikroprocesorowe RP5 i RP6. Każdy rejestrator obsługiwany był przez jednego pomiarowego i przeznaczony był do rejestracji danych ruchowych z pojedynczego pasa ruchu (rys. 1). Zarejestrowane przejazdy pojazdów i zmiany sygnałów zapisywane były w pamięci rejestratora, a następnie poddane zostały obróbce i analizie w programie Excell i Statistica.



Rys. 1. Wybrany poligon badawczy oraz przyrządy pomiarowe RP5 i RP6

2.1. Założenia dotyczące poligonów badawczych

Dla przeprowadzenia badań empirycznych wyselekcjonowano poligony badawcze tak, aby charakterystyki geometryczne oraz ruchowe analizowanych wlotów odpowiadały w przybliżeniu warunkom wyjściowym wg [1, 2]. Badania ograniczono do skrzyżowań miejskich. Poniżej przedstawiono wybrane, najważniejsze założenia:

- podczas nadawania sygnału zielonego powinno występować pełne nasycenie ruchem, co przekłada się na występowanie kolejek pozostających w okresie pomiarowym trwającym minimum 40 cykli sygnalizacyjnych,
- nie występuje blokowanie ruchu oraz tarczy skrzyżowania, co oznacza, że kolejka z poprzedniego skrzyżowania nie wpływa na pojazdy opuszczające badany wlot,
- małe pochylenie podłużne wlotu ($i \pm 1,5\%$), typowe szerokości pasów ruchu (około 3,5 m), dobry stan techniczny nawierzchni w tym torowiska tramwajowego, ewentualne zakrzywienie toru jazdy o dużym promieniu i niewielkim kącie zwrotu ($R > 100$, $\gamma < 10^\circ$). Czynniki te nie wpływają na zachowania kierujących pojazdami oraz dynamikę ruchu,

2.2. Baza danych

W wyniku przeprowadzonych w latach 2007–2009 badań terenowych na 11 wlotach skrzyżowań w Krakowie z relacją na wprost prowadzoną z 1, 2 i 3 pasów ruchu zbudowano w programie Excell bazę danych zawierającą pomierzone wartości odstępów czasu pomiędzy pojazdami oraz długości kolejek pozostających. W rezultacie zarejestrowano 38275 cykli sygnalizacyjnych o łącznym czasie badań 1155 godzin.

Badania empiryczne wykonywano głównie w szczycie popołudniowym. Badania prowadzono dla każdego pasa ruchu (poligonu) oddzielnie w wyróżnionych poniżej grupach warunków pogodowych:

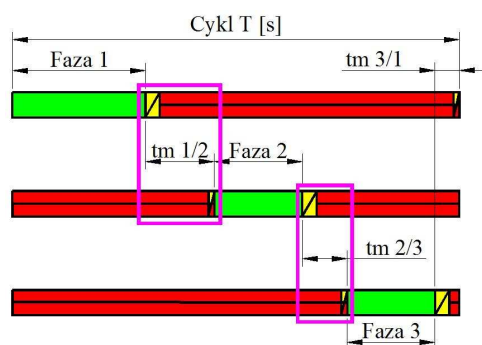
- słonecznie i pochmurno, przy suchej nawierzchni,
- opady długotrwałe i krótkotrwałe deszczu. Opad długotrwały to opad o różnej intensywności deszczu, zazwyczaj ciągły z możliwymi chwilowymi przerwami,

trwający przez większą część dnia, cały dzień lub kilka kolejnych dni. Opad krótkotrwały to opad nagły o różnej intensywności deszczu, w dniu, w którym dominuje słoneczna lub pochmurna pogoda i nawierzchnia jest sucha.

- pochmurno, mokra nawierzchnia i inne.

3. ANALIZA ZACHOWAŃ KIERUJĄCYCH POJAZDAMI PRZY ZMIANIE SYGNAŁÓW ŚWIETLNYCH

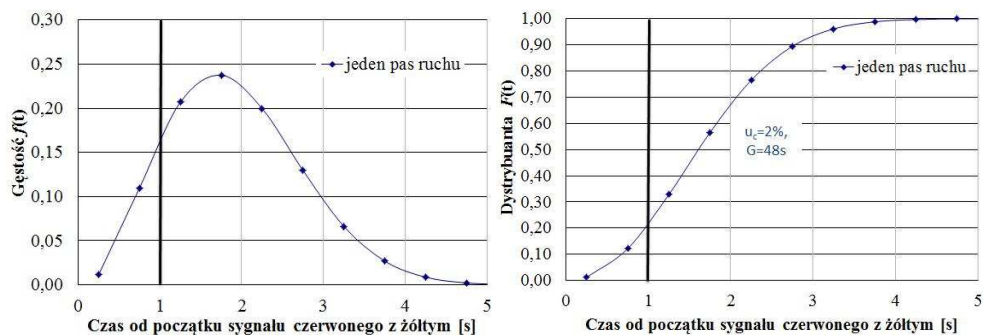
Z przeprowadzonych obserwacji zatłoczeń na analizowanych pasach ruchu wynika że kierujący pojazdami podejmowali gwałtowne decyzje przy przejeździe przez skrzyżowanie, które mogły zagrazać innym użytkownikom ruchu. Niektórzy kierujący przedwcześnie przekraczali linię zatrzymań, a po zakończeniu sygnału zielonego wykorzystywali na zjazd ze skrzyżowania pełną długość sygnału żółtego i zjeżdżali w sygnale czerwonym. Występowanie faz ruchu z przedwczesnymi wjazdami i zjazdami na sygnale żółtym i czerwonym przekłada się na występowanie niebezpiecznego skrócenia wyliczonych długości czasów międzymiędzyfaz (rys. 2) zaimplementowanych w sterowniku sygnalizacji.



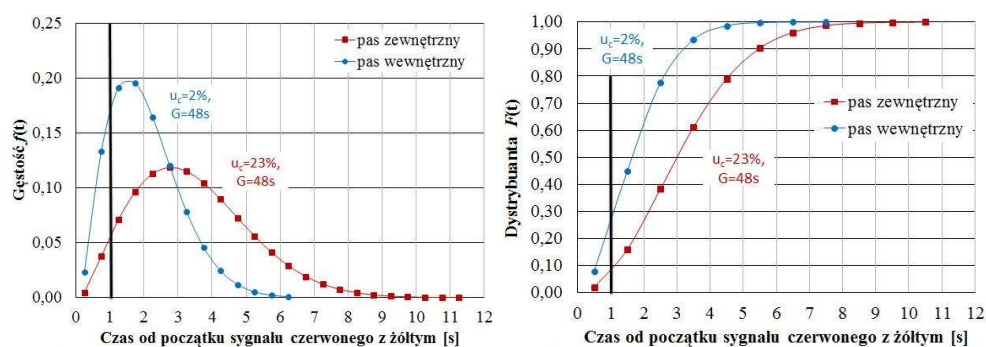
Rys. 2. Czasy międzymiędzyfazowe pomiędzy fazami ruchu

3.1 Wjazdy na sygnale czerwonym z żółtym

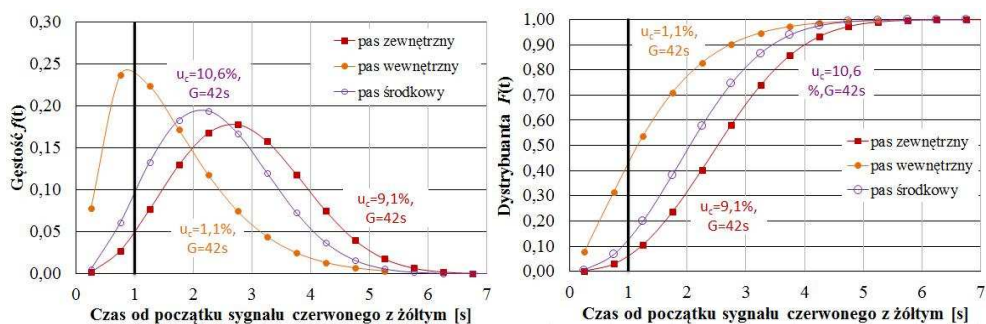
W celu określenia liczby i procentowego udziału wjazdów pojazdów na skrzyżowanie w sygnale czerwonym z żółtym poprzedzającym sygnał zielony rejestrowano moment przejazdu przodu pojazdu przez linię zatrzymań. Badania wykonano na wybranych poligonach 1, 2 i 3 pasowych w Krakowie w warunkach korzystnych ruchowo tj. podczas słonecznej pogody i przy suchej nawierzchni. Przedstawione wyniki analiz odnoszą się do obowiązującej wg [3] długości czasu trwania sygnału czerwonego z żółtym wynoszącej 1 s. Rozkłady teoretyczne dopasowano do danych empirycznych za pomocą testu zgodności Kołmogorowa–Smirnowa na poziomie istotności $\alpha = 0,05$. Rozważano następujące rozkłady teoretyczne: normalny, log-normalny, gamma i Weibulla. Dla zaprezentowanych danych najlepszym rozkładem okazał się rozkład Weibulla który charakteryzuje się silną lewostronną asymetrią oraz rozkład normalny. Kształt rozkładu uzależniony jest od udziału pojazdów ciężkich w ruchu. Liczebności prób (cykli) dla każdego analizowanego przypadku wahała się od 90 do 150.



Rys. 3. Funkcja gęstości oraz dystrybuanta rozkładu odstępów czasu przy przejeździe przodu pierwszego pojazdu przez linię zatrzymań dla poligonu jednopasowego



Rys. 4. Funkcje gęstości oraz dystrybuanty rozkładów odstępów czasu przy przejeździe przodu pierwszego pojazdu przez linię zatrzymań dla poligonu dwupasowego



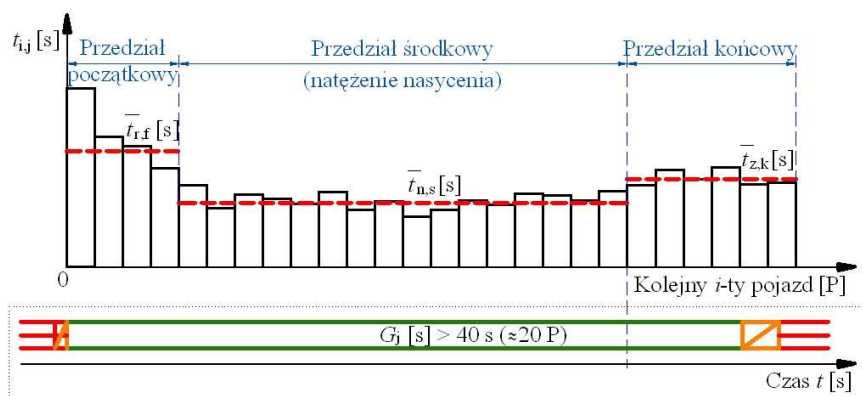
Rys. 5. Funkcje gęstości oraz dystrybuanty rozkładów odstępów czasu przy przejeździe przodu pierwszego pojazdu przez linię zatrzymań dla poligonu trzypasowego

Z przeprowadzonych analiz wynikają następujące wnioski:

1. Dla pasów wewnętrznych, przy małym udziale pojazdów ciężkich odnotowano największą liczbę przedwczesnych wjazdów. Udział ten wynosi: 20% dla poligonów jednopasowych oraz 30 % i 42 % dla pasa wewnętrznego w grupie z dwoma i trzema pasami ruchu dla relacji na wprost;
2. Im większa liczba pasów ruchu dla relacji na wprost tym większy jest udział przedwczesnych wjazdów na pasach wewnętrznych prowadzących głównie ruch pojazdów osobowych. Uwidacznia się zatem efekt wzajemnego oddziaływania kierujących pojazdami poruszających się w grupach;
3. Udział pojazdów ciężkich w ruchu wpływa na sposób ruszania pojazdów. Im większy jest udział pojazdów ciężkich w ruchu tym większe jest prawdopodobieństwo wystąpienia pojazdu ciężkiego na pierwszej pozycji w kolejce. Stąd udział przedwczesnych wjazdów na pasach zewnętrznych jest najmniejszy i wynosi od 5 % do 10%. W grupie dwu i trzypasowej pasem zewnętrznym poruszały się pojazdy ciężkie w tym pojazdy typu „tir”;
4. Z rys. 5 można wywnioskować że segregacja ruchu ciężkiego na poszczególnych pasach ruchu w grupie trzypasowej przekłada się na liczbę przedwczesnych wjazdów.

3.2. Przejazdy w trakcie nadawania sygnału zielonego

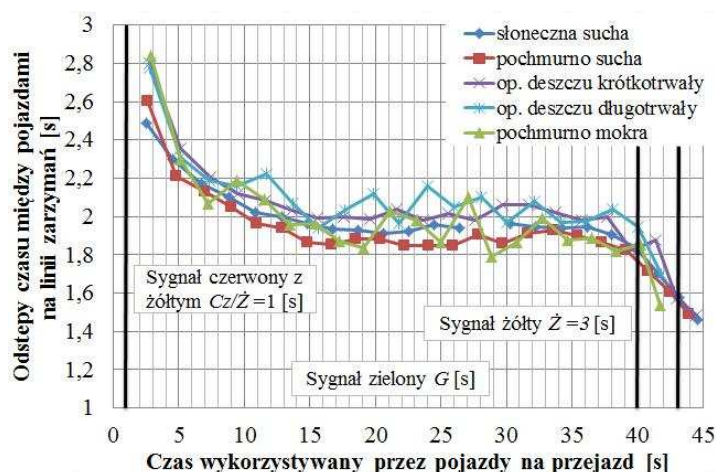
W rozdziale przedstawione zostaną analizy dotyczące średnich odstępów czasu między tylnymi zderzakami pojazdów przejeżdżających przez linię zatrzymań (rys. 7). W metodzie analiz podzielono sygnał zezwalający na ruch na trzy przedziały (rys. 6) i zastosowano podejście oparte na odstępach czasu pomiędzy parami pojazdów osobowych [4]. W analizach odrzucano odstępy czasu występujące pomiędzy parami pojazdów, w których zarejestrowano pojazdy ciężkie lub dostawcze.



Rys. 6. Ogólny, teoretyczny podział sygnału zielonego na przedziały

W pracy [4] wykazano że przy większym niż 10% udziale pojazdów ciężkich w ruchu analiza odstępów czasu w odniesieniu do par pojazdów osobowych obarczona jest wpływem pojazdów ciężkich. Zaistniałe różnice wynikają z nieujętego w analizach, a „ukrytego” oddziaływania pojazdów ciężkich występującego przy dużym ich udziale.

Pojazdy ciężkie oddziałują nie tylko na pojazdy stojące bezpośrednio za nimi, lecz wpływają również na poruszanie się kolejnych pojazdów. Występowanie kilku pojazdów ciężkich poprzedzających pojazdy osobowe zmniejsza średni odstęp par pojazdów osobowych. Na rys. 7 przedstawiono wyniki badań empirycznych dla pasa wewnętrznego poligonu trzypasowego zlokalizowanego w Krakowie ($U_c = 1,1\%$). Liczebności prób (cykli) dla każdego średniego odstępu czasu wahała się od 30 do 1574.



Rys. 7 Wykres ukazujący zjazdy kolejnych pojazdów osobowych z pasa wewnętrznego na poligonie trzypasowym w Krakowie w szczycie popołudniowym

Z obserwacji ruchu wynikają następujące spostrzeżenia, które przełożone zostały na analizy statystyczne odstępów czasu. Kierujący pierwszymi pojazdami nieświadomie wymuszają określone zachowania na kolejnych kierujących jadących z tyłu. W opadach deszczu, gdy widoczność jest częściowo ograniczona, kierujący po opuszczeniu skrzyżowania przyspieszają do określonej, najczęściej niskiej, bezpiecznej prędkości jazdy. Takie zachowania wymuszają na kolejnych kierujących przejeżdżających przez linię zatrzymań dostosowanie się do określonych warunków ruchowych, które są na ogół respektowane przez kierujących. Takie ostrożne przejazdy przez skrzyżowanie kilku pierwszych kierujących pojazdami w niekorzystnych warunkach pogodowych powodują szybką stabilizację odstępów między pojazdami i obniżenie intensywności obsługi w przedziale środkowym. W dobrych warunkach pogodowych, np. przy słonecznej pogodzie, kierujący, zjeżdżając ze skrzyżowania, zachowują się swobodnie i przyspieszają, dopóki nie zostanie osiągnięta założona przez kierujących prędkości jazdy. 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 osiągnięcia większych prędkości zjazdu ze skrzyżowania, ale potrzebują więcej czasu na osiągnięcie granicznie niskich odstępów czasu między pojazdami, które utożsamiane są z wysoką intensywnością obsługi w przedziale środkowym.

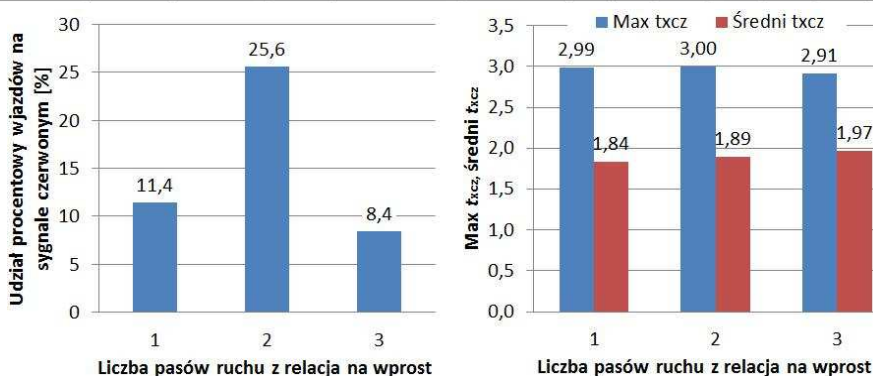
Reasumując, kierujący potrzebują mniej czasu (mniejszy czas stracony w przedziale początkowym) do osiągnięcia ustabilizowanego poziomu odstępów czasu między pojazdami w przedziale środkowym sygnału zielonego w niekorzystnych warunkach pogodowych niż przy słonecznej lub pochmurnej pogodzie przy suchej nawierzchni.

3.3 Przejazdy w sygnale żółtym i czerwonym

W stanach nasycenia ruchem występujących w szczytach ruchowych, gdy kierujący pojazdami oczekują na zjazd ze skrzyżowania w długich kolejkach bardzo często dochodzi do sytuacji w których sygnał żółty jest w pełni wykorzystywany przez pojazdy. Takie zachowania występują najczęściej w dużych miastach [5]. Kierujący traktują sygnał żółty jako przedłużenie sygnału zielonego. Przy zjeździe w sygnale żółtym dochodzi do bardzo niebezpiecznych sytuacji skracania odstępów między pojazdami (nawet do 1,5s) oraz wjazdów na sygnale czerwonym. Na rys. 7 łatwo zauważyć, że w przedziale końcowym kierujący zbliżają się do poprzednika na bardzo bliską i niebezpieczną odległość (średnie odstępów wynoszą od 1,8s do 1,5 s). Występuje bardzo duże prawdopodobieństwo kolizji z najechaniem na tył pojazdu w sytuacji gdy kierujący nagle przyhamuje w sygnale żółtym w celu zatrzymania pojazdu na co zezwalają przepisami ruchu drogowego. Zauważono, że przy zjeździe w sygnale żółtym kierujący opierają swoją decyzję na zachowaniu kierującego, poprzednika. Takie zachowania przeczą obowiązującej w ruchu drogowym zasadzie ograniczonego zaufania.

Tablica 1. Wjazdy na sygnale czerwonym z pasa wewnętrznego relacji na wprost dla poligonów jedno- i wielopasowych zlokalizowanych w Krakowie

Liczba pasów w grupie pasów	Liczba cykli	Ogólna liczba i % wjazdów na syg. czerwonym	Liczba i % wjazdów więcej niż 1 pojazdu (2, 3) na syg. czerwonym	Max $t_{x\text{cz}}$ [s]	Min. $t_{x\text{cz}}$ [s]	Średni $t_{x\text{cz}}$ [s]	σ [-]
1	8129	926/11,4%	152/1,9%	-2,99	-0,70	-1,84	0,47
2	4791	1229/25,6%	259/5,4%	-3,00	-0,60	-1,89	0,51
3	5688	478/8,4%	31/0,5%	-2,91	-1,06	-1,97	0,44



Rys. 8 Udział procentowy wjazdów w sygnale czerwonym oraz maksymalne i średnie czasy wjazdów pojazdów po zapaleniu się sygnału czerwonego na analizowanych poligonach

Z danych zawartych w tabl. 1 wynika, że wjazdy na sygnale czerwonym w stanach nasycenia ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną w Krakowie występują bardzo często (od 8% do 25%). Kierujący wjeżdżający na skrzyżowanie na sygnale czerwonym, czyli w okresie trwania czasu międzzielonego, złamali prawo i stanowili realne zagrożenie dla innych uczestników ruchu drogowego. Należy zaznaczyć że pojazdy wjeżdżające na sygnale czerwonym nie blokowały tarczy skrzyżowania.

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych analiz sformułowano następujące wnioski:

1. Występuje znaczący procent kierujących ruszających przedwcześnie na pasach prowadzących relację na wprost. Udział ten zależy od lokalizacji pasów ruchu w grupie pasów oraz od udziału pojazdów ciężkich w ruchu i waha się od 5% do 42%.
2. W porównaniu do badań prowadzonych w pracy [6], zmiana długości sygnału czerwonego z żółtym z 2s na 1s znacznie zmniejszyła udział pojazdów wjeżdżających na skrzyżowanie w sygnale czerwonym z żółtym poprzedzającym sygnał zielony.
3. W stanach nasycenia ruchem kierujący pojazdami mają ograniczone możliwości wykonywania manewrów przy zjeździe ze skrzyżowania w czasie nadawania sygnału zielonego. Prędkości przejazdu i odstępy między pojazdami zależą od wielu czynników w tym warunków pogodowych oraz od struktury rodzajowej ruchu. Zmienne wartości odstępów czasu między pojazdami przekładają się na zmienne przepustowości pasów ruchu.
4. Obecność licznych wjazdów na sygnale czerwonym może zależeć od liczby pasów w grupie pasów (tabl. 1), liczby wlotów i typu skrzyżowania, w tym od obecności wlotu po prawej stronie, długości sygnału czerwonego, wielkości przeciążenia ruchu oraz od warunków pogodowych (widoczności). Określenie głównych przyczyn wjazdów na sygnale czerwonym będzie tematem dalszych prac w celu wypracowania i wskazania metod nadzoru dla poprawy bezpieczeństwa ruchu drogowego.
5. Występujące w stanach nasycenia ruchem przedwczesne wjazdy na skrzyżowanie oraz przejazdy w sygnale żółtym i czerwonym skracają wyliczony czas międzzielony co może w niektórych skrajnych sytuacjach doprowadzić do zdarzenia drogowego.
6. Przeciążenia wpływają negatywnie na zachowania kierujących pojazdami wskutek czego obniża się poziom bezpieczeństwa ruchu przy sterowaniu sygnalizacją świetlną.

5. Bibliografia

- [1] Tracz M., Chodur J., Gaca S., Gondek S., Kieć M., Ostrowski K.: *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, Warszawa, GDDKiA 2004.
- [2] *Canadian capacity guide for signalized intersections*, ITE, Canada 2008.
- [3] Dz. U. Nr 220, poz. 2181 z dnia 23.12.2003 r.: *Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych i warunki ich umieszczenia na drogach. Załącznik nr 2 i 3*.
- [4] Ostrowski K.: *Zmienność natężeń nasycenia relacji na wprost na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną*, 56 Konferencja naukowa, Krynica 2010.
- [5] Gondek S.: *Problem wjazdu pojazdów na skrzyżowanie na sygnale czerwonym*, Logistyka 3/2008.
- [6] Chodur J. Ostrowski K.: *Odstępy czasu między pojazdami przejeżdżającymi linię zatrzymań na sygnale zielonym*, Transport Miejski i Regionalny 12/2005.