

# Priorytet dla pojazdów transportu zbiorowego w programie sygnalizacji świetlnej na podstawie liczby pasażerów w pojeździe<sup>1</sup>

**JAN ALEKSANDROWICZ**

mgr inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, e-mail: jaleksandrowicz@pk.edu.pl

**ALEKSANDRA STRÓŻEK**

mgr inż., Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, e-mail: aleksandra.strozek@pk.edu.pl

**Streszczenie:** W artykule zaprezentowano opracowaną funkcję do wyznaczania priorytetu w programach sygnalizacji świetlnej dla pojazdów transportu publicznego z uwzględnieniem aktualnej liczby pasażerów w pojeździe oraz kosztów społecznych transportu. Przedstawione zostały wybrane sposoby detekcji pojazdów, w tym pojazdów transportu zbiorowego pod kątem możliwych do uzyskania danych. Zaprezentowane zostały najważniejsze technologie automatycznych systemów zliczania pasażerów oraz dokładność, z jaką zbierane są dane. W artykule omówiono także społeczne koszty transportu, które zostały podzielone na trzy grupy: wewnętrzne, zewnętrzne oraz pośrednie. Na podstawie zebranych danych z literatury i badań własnych opracowano funkcje kosztów zatrzymania pojazdu przed skrzyżowaniem, oddzielnie dla transportu publicznego i indywidualnego. Dla opracowanej funkcji kosztu priorytetu na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną przedstawiono możliwe jej zastosowania. Artykuł zakończono podsumowaniem i planem dalszych badań nad tematem.

**Słowa kluczowe:** transport zbiorowy, priorytety dla transportu zbiorowego, automatyczne systemy zliczania pasażerów, sterowanie ruchem, koszty społeczne transportu.

## Wprowadzenie

Priorytety w programach sygnalizacji świetlnej dla pojazdów miejskiego transportu zbiorowego są coraz powszechniejszym sposobem skracania czasu przejazdu linii transportu publicznego. Udogodnienia te najczęściej związane są ze zmianą w cyklu sygnalizacji świetlnej po wykryciu zbliżania się pojazdu transportu publicznego do skrzyżowania przez detektory ruchu. W procesie detekcji pojazdów wykorzystywane są rozwiązania, dzięki którym możliwe jest określenie różnych parametrów poruszającego się pojazdu [1]. Detektory są także wykorzystywane w przypadku transportu indywidualnego przejeżdżającego przez skrzyżowania z priorytetem w sygnalizacji świetlnej dla transportu publicznego. Systemy te umożliwiają:

- określenie liczby pojazdów przejeżdżających przez skrzyżowanie z każdego wlotu,
- określenie liczby pojazdów oczekujących na przejazd w sytuacji wysokiego natężenia ruchu i tworzenia się kolejek przed skrzyżowaniami.

Najczęściej wykorzystywanym sposobem detekcji pojazdów w transporcie publicznym i transporcie indywidualnym są pętle indukcyjne. Umożliwiają one pozyskanie informacji o obecności pojazdu nad pętlą lub o przejechaniu

pojazdu nad detektorem. Wśród innych popularnych metod detekcji można wymienić: wideo detekcję oraz detekcję radiową (częściej wykorzystywaną w transporcie publicznym) [1].

W procesie nadawania priorytetów pojazdom transportu publicznego wykorzystywane są najczęściej dane związane z obecnością pojazdu w obszarze detekcji. Przyjęta w ten sposób metoda nadawania priorytetów nie uwzględnia innych aspektów, związanych z funkcjonowaniem systemu transportowego, takich jak:

- koszty zatrzymania i ponownego rozpędzenia pojazdów indywidualnych i transportu publicznego,
- kosztów czasu traconego podczas oczekiwania na możliwość przejazdu przez skrzyżowanie,
- liczby pasażerów w pojazdach miejskiego transportu zbiorowego,
- liczby pojazdów indywidualnych oczekujących na wlotach skrzyżowania.

W przypadku uwzględnienia tych czynników w procesie nadawania priorytetów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną niezbędne jest pozyskiwanie informacji na ich temat w czasie rzeczywistym. Można to osiągnąć, wykorzystując automatyczne systemy zliczania pasażerów oraz sygnały z detektorów drogowych. Uzyskane w ten sposób dane umożliwiają wyliczenie kosztów zatrzymania przed skrzyżowaniem, zarówno dla transportu indywidualnego, jak i transportu publicznego. Niezbędnym elementem obliczeń są funkcje, dzięki którym można określić wielkość jednostkowych kosztów eksploatacji pojazdów i czasu traconego.

## Koszty społeczne transportu

Wpływ systemu transportowego na otoczenie określa się za pomocą kosztów. Nie są to tylko koszty ponoszone przez przedsiębiorstwo zajmujące się działalnością transportową, ale odnoszą się one również do kosztów społecznych, które są ponoszone przez całe społeczeństwo oraz środowisko [2]. Koszty społeczne dzieli się na trzy grupy:

- wewnętrzne,
- zewnętrzne,
- pośrednie.

Koszty wewnętrzne ponoszone są bezpośrednio przez użytkowników systemu transportowego oraz nakładane są na nich przez rynek. Przykłady kosztów wewnętrznych transportu zostały zaprezentowane w tabeli 1.

<sup>1</sup> ©Transport Miejski i Regionalny, 2021. Wkład autorów w publikację: J. Aleksandrowicz 50%, A. Strózek 50%.

Drugą grupę stanowią koszty zewnętrzne, które są ponoszone przez społeczeństwo i środowisko w związku z funkcjonowaniem systemu transportowego [3]. Czynniki, które wpływają na koszty zewnętrzne, jest bardzo dużo, w związku z czym kompleksowe wyznaczenie wszystkich kosztów zewnętrznych jest procesem trudnym [4]. Przykłady kosztów zewnętrznych transportu przedstawiono w tabeli 1.

Ostatnią grupą są koszty pośrednie, które ze względu na swoją specyfikę są ciężkie do oszacowania. Jest to powód, przez który koszty te są często pomijane podczas obliczania ogólnych kosztów transportu. Przykłady kosztów pośrednich przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Koszty społeczne transportu		
Koszty wewnętrzne	Koszty zewnętrzne	Koszty pośrednie
<ul style="list-style-type: none"> <li>koszty związane z eksploatacją pojazdów (zakup, paliwo),</li> <li>koszt biletu,</li> <li>koszty związane z infrastrukturą (np. podatki od środka transportu, paliwowe),</li> <li>koszty związane z wypadkami,</li> <li>straty czasu związane z zatłoczeniem,</li> <li>koszty środowiskowe.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>koszty związane z obsługą infrastruktury oraz jej uszkodzeniami,</li> <li>koszty wypadków i zanieczyszczenia środowiska (np. wyczerpywanie nieodnawialnych źródeł energii), nie zawarte w kosztach wewnętrznych, ponoszone przez osoby nie będące użytkownikami systemu,</li> <li>negatywny wpływ na zdrowie i życie społeczeństwa,</li> <li>straty czasu osób nie będących użytkownikami systemu,</li> <li>koszty związane z emisją dźwięku i hałasu do środowiska, uciążliwością transportu, kongestią.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>koszty związane z emisją zanieczyszczeń do środowiska oraz zmianami klimatycznymi wynikającymi z produkcji paliw i energii elektrycznej oraz produkcji i utrzymania środków transportu i infrastruktury,</li> <li>koszty związane z utylizacją odpadów wytworzonych w procesie funkcjonowania systemu transportu.</li> </ul>

Źródło: opracowanie własne na podstawie [3, 4]

### Koszty strat czasu i eksploatacji pojazdów

Koszty podróży z punktu widzenia użytkowników systemu transportowego (koszty wewnętrzne), niezależnie od wybranego środka transportu, dzielą się na pieniężne i niepieniężne. Porównując ze sobą te koszty, należy wziąć pod uwagę wszystkie etapy podróży: od miejsca początku podróży, czasu dojścia na przystanek transportu publicznego czy do pojazdu indywidualnego, przez właściwy czas podróży, aż do czasu dojścia do celu podróży [5].

Koszty niepieniężne związane z czasem trwania podróży będą inne w zależności od wyboru środka transportu. W przypadku pojazdów indywidualnych nie występuje czas oczekiwania na przystanku, jednak charakterystyczny dla tego rodzaju podróży jest np. czas związany z poszukiwaniem miejsca parkingowego [5].

Pięniężnymi kosztami podróży w przypadku transportu indywidualnego są wszelkie koszty związane z eksploatacją pojazdu i ewentualnie koszty parkingu, natomiast podczas podróży pojazdem komunikacji zbiorowej jest koszt biletu [5].

Uogólniony koszt podróży można przedstawić jako sumę kosztów pieniężnych i kosztów czasu z wykorzystaniem następującego wzoru [5, 6]:

$$GP = P + T \cdot VOT$$

gdzie:

$GP$  – uogólniony koszt podróży,

$P$  – koszty pieniężne,

$T$  – czas,

$VOT$  – wartość czasu.

Wartość kosztu czasu podróży określa się jako maksymalny koszt (wyrażony w jednostce pieniężnej na daną jednostkę czasu), jaki użytkownik jest skłonny ponieść, aby zyskać jedną jednostkę czasu, przy niezmiennych pozostałych parametrach podróży [7]. Wartość czasu podróży jest indywidualnie przypisywana do każdego użytkownika systemu transportowego, subiektywna, i zależy od: wysokości jego zarobków, wygody podróżowania, celu podróży oraz samopoczucia. Istotnym elementem czasu podróży jest czas tracony w wyniku kongestii drogowej. Jednym z czynników wpływających na powstawanie kongestii drogowej jest sygnalizacja świetlna na skrzyżowaniach. Można na tej podstawie stwierdzić, że istotnym składnikiem kosztu czasu podróży jest koszt oczekiwania na przejazd przez skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną [8].

Koszty pieniężne podróży można określić np. na podstawie: ilości zużytego paliwa, taryfy biletowej w pojazdach transportu publicznego i wysokości opłat za parkowanie. Koszty te zależą od następujących czynników: długości podróży, warunków drogowych, czasu postoju i typu pojazdu. Efektem tego są różne koszty podróży po tych samych odcinkach drogowych w różnych godzinach i różnymi środkami transportu. Zwiększające się natężenie ruchu drogowego wpływa istotnie na wzrost kosztów eksploatacji pojazdów (częstsze zatrzymania pojazdów, mniejsza prędkość przejazdu). Istotny wpływ na wzrost liczby zatrzymań w transporcie drogowym mają skrzyżowania z sygnalizacją świetlną. W ich przypadku koszty pieniężne można określić na podstawie czasu oczekiwania na przejazd przez skrzyżowanie.

Na potrzeby wykonywanych obliczeń kosztów strat czasu w transporcie przyjmuje się, że wartość czasu podróży stanowi połowę stawki średniego wynagrodzenia za pracę. Wyznaczona stawka w horyzoncie do 2030 roku ma docelowo wynieść 24 PLN/h ( $VOT$ ) [8].

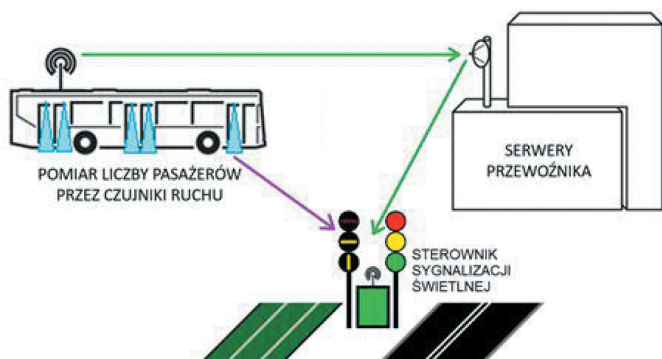
### Automatyczne systemy zliczania pasażerów

Automatyczne systemy zliczania pasażerów umożliwiają zbieranie danych na temat liczby pasażerów w pojeździe na każdym odcinku międzyprzystankowym z dokładnością do jednego pasażera. Dane gromadzone są w formie informacji na temat liczby pasażerów wsiadających i wysiadających z pojazdu na każdym przystanku. Dodatkowo dane uzupełniane są o współrzędne lokalizacyjne każdego przystanku oraz dokładną godzinę, o której miało miejsce zatrzymanie i obsługa pasażerów. Do najczęściej wykorzystywanych technologii czujników stosowanych w automatycznych systemach zliczania pasażerów (w skrócie: ASZP) zalicza się:

- czujniki na podczerwień,
- czujniki wykorzystujące obraz wideo z kamer,
- czujniki laserowe.

Każda z technologii ma swoje zalety i wady. W zależności od wykorzystanej w systemie technologii, producenci deklarują różne poziomy zgodności danych zbieranych automatycznie z rzeczywistą liczbą pasażerów wsiadających i wysiadających [9]. Zrealizowane pomiary weryfikujące prace ASZP wykazały zgodność danych na poziomie 60%. Zgodność ta odnosiła się do liczby pasażerów wsiadających i wysiadających z pojazdu [9, 10, 11].

Dane z pojazdów gromadzone są w pamięci komputerów pokładowych i zgrywane na serwery po zjeździe pojazdu do zajezdni. Dane przekazywane w ten sposób umożliwiają wykorzystanie ich we wszelkiego rodzaju analizach dotyczących potoków pasażerskich. Z punktu widzenia wykorzystania danych w inteligentnych systemach transportowych (systemy ITS) odpowiedzialnych za sterowanie ruchem drogowym dane gromadzone w taki sposób nie mogą być wykorzystywane w czasie rzeczywistym. Aby dane z ASZP były przydatne z punktu widzenia sterowników sygnalizacji świetlnej, musiałyby być przesyłane w czasie rzeczywistym do serwerów, a następnie do sterowników sygnalizacji świetlnej lub bezpośrednio do sterowników sygnalizacji świetlnej [9] (co zostało przedstawione w formie schematu na rys. 1).



Rys.1. Przepływ danych pomiędzy automatycznym systemem zliczania pasażerów a sterownikiem sygnalizacji świetlnej

Na podstawie danych przesyłanych w czasie rzeczywistym do sterowników sygnalizacji świetlnej możliwe jest wykorzystanie informacji o liczbie pasażerów w pojeździe w procesie przydzielania priorytetów na skrzyżowaniu dla pojazdu transportu publicznego. Informacja ta umożliwiłaby nadawanie priorytetów w sygnalizacji świetlnej, na podstawie kryterium kosztów eksploatacyjnych i strat czasu, w odniesieniu do pojedynczego użytkownika ruchu.

### Priorytety dla pojazdów transportu zbiorowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną

Udogodnienia dla pojazdów miejskiego transportu zbiorowego w ruchu drogowym można wprowadzać na różne sposoby, poprzez:

- zmiany infrastrukturalne (m.in. wydzielanie pasów autobusowych czy bezkolizyjność torowisk tramwajowych),
- zmiany organizacyjne (m.in. priorytety w sygnalizacji świetlnej czy zmiany pierwszeństwa przejazdu).

W obu przypadkach celem zmian jest skrócenie czasu przejazdu środkami miejskiego transportu zbiorowego. Efektem wprowadzanych zmian jest zwiększenie atrakcyjności transportu publicznego. W obrębie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną najczęściej stosowanym rozwiązaniem usprawniającym ruch pojazdów miejskiego transportu zbiorowego jest stosowanie priorytetów w programach sygnalizacji świetlnej. Priorytety tego typu można podzielić na: bezwzględne (częściej stosowane na przejazdach przez torowisko tramwajowe) i względne (uzależnione od różnych czynników). W przypadku priorytetów warunkowych (względnych) nadanie sygnału zezwalającego na przejazd przez skrzyżowanie dla pojazdów transportu zbiorowego uzależnione jest od obliczeń algorytmu sterującego sygnalizacją świetlną. Najczęściej stosowanymi metodami są:

- metoda uruchomienia dodatkowej fazy w cyklu dla pojazdu transportu zbiorowego, po zakończeniu wyświetlenia fazy wyświetlanej w momencie zgłoszenia z detektorów o zbliżaniu się do skrzyżowania pojazdu transportu zbiorowego;
- metoda skracania do minimum wszystkich faz w cyklu, które muszą zostać uruchomione, przed wyświetleniem fazy dla transportu zbiorowego – kolejność faz w cyklu zawsze jest ta sama.

W obu przypadkach zdarzają się sytuacje, w których mimo wprowadzonego priorytetu pojazdy transportu zbiorowego zatrzymują się.

Kwestie priorytetów w sygnalizacji świetlnej dla transportu zbiorowego należy także rozpatrywać pod kątem transportu indywidualnego. Nadawanie priorytetu wpływa na ruch pojazdów indywidualnych poprzez zwiększenie czasu przejazdu przez skrzyżowanie. W przypadku małych, peryferyjnych skrzyżowań, gdzie ruch pojazdów transportu zbiorowego nie jest duży, wpływ priorytetów na ruch pojazdów indywidualnych będzie istotnie mniejszy niż w przypadku dużych skrzyżowań (zwłaszcza takich, gdzie dochodzi do krzyżowania się różnych linii transportu zbiorowego). Stosowanie priorytetów bezwzględnych na skrzyżowaniach o dużym natężeniu ruchu pojazdów indywidualnych i transportu zbiorowego mogłoby skutkować znacznym zwiększeniem kongestii drogowej. Problemem, jaki zauważono podczas obserwacji na skrzyżowaniach, było uniezależnienie przyznawania priorytetu od sytuacji na drogach wlotowych skrzyżowania oraz liczby pasażerów korzystających z pojazdu transportu zbiorowego. Zauważone zostały dwie skrajne sytuacje:

- zatrzymanie pojazdu transportu zbiorowego przewożącego dużą liczbę pasażerów w celu przepuszczenia kilku oczekujących pojazdów indywidualnych (przy niskim natężeniu ruchu pojazdów indywidualnych na wlotach skrzyżowania),
- skrócenie do minimum lub pominięcie fazy dla pojazdów indywidualnych oczekujących w kolejce w celu przepuszczenia pojazdu transportu zbiorowego przewożącego bardzo małą liczbę pasażerów (przy wysokim lub bardzo wysokim natężeniu ruchu pojazdów indywidualnych na wlotach skrzyżowania).

Obu wyżej wymienionych sytuacji udałooby się uniknąć, gdyby w przypadku przydzielania priorytetu w sygnalizacji świetlnej dla transportu zbiorowego brano pod uwagę koszty społeczne transportu. Obecnie uwzględnianie tego typu kosztów w procesie decyzyjnym jest już możliwe, ponieważ dostępne są urządzenia i systemy automatycznie zliczające pojazdy indywidualne zbliżające się do skrzyżowania lub oczekujące w kolejce oraz pasażerów w pojazdach transportu zbiorowego.

### Przykład zastosowania kosztów społecznych transportu i danych z ASZP w programie sygnalizacji świetlnej z priorytetem dla transportu zbiorowego

Przedstawione w artykule zagadnienia dotyczące kosztów zewnętrznych i wewnętrznych transportu oraz danych z automatycznych systemów zliczania pasażerów dają podstawę wnioskować, że mogą być one wykorzystane w procesie nadawania priorytetu dla pojazdów miejskiego transportu zbiorowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Opracowana została w tym celu funkcja przyjmująca wartości ze zbioru  $\{0,1\}$ , gdzie wartość 1 oznacza nadanie priorytetu dla pojazdu transportu zbiorowego, a wartość 0 brak nadania priorytetu. Funkcja została przedstawiona w następujący sposób:

$$F(t_{tz}, np, t_{ti}, lp) = \begin{cases} 1 & \text{dla } f(ttz, np) - g(tti, lp) \geq 0 \\ 0 & \text{dla } f(ttz, np) - g(tti, lp) < 0 \end{cases}$$

gdzie:

- $F(t_{tz}, np, t_{ti}, lp)$  – funkcja kosztu priorytetu na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną,
- $f(t_{tz}, np)$  – funkcja kosztów zatrzymania pojazdu transportu zbiorowego,
- $g(t_{ti}, lp)$  – funkcja kosztów zatrzymania pojazdów transportu indywidualnego.

Na podstawie przeprowadzanej analizy literatury i wykonanych prac badawczych podjęto próbę zapisania w sposób formalny funkcji kosztów zatrzymania dla transportu zbiorowego i transportu indywidualnego. Pierwszym etapem prac było przyjęcie założeń, jakie muszą być spełnione, aby była możliwość wykorzystania opracowanej funkcji:

- detektory dla transportu zbiorowego muszą być zlokalizowane w takiej odległości od sygnalizatorów, aby pojazd potrzebował na przejechanie tego dystansu (ze stałą dopuszczalną prędkością maksymalną na odcinku) więcej czasu, niż trwa najdłuższy czas międzycielony w programie sygnalizacji świetlnej;
- detektory dla pojazdów indywidualnych zbierają informacje na temat liczby pojazdów oczekujących przed skrzyżowaniem dla każdego wlotu;
- każdy pojazd transportu zbiorowego przejeżdżający przez skrzyżowanie wyposażony jest w automatyczny system zliczania pasażerów umożliwiający przesyłanie aktualnych danych o liczbie pasażerów w pojeździe w czasie rzeczywistym;

- każdy pojazd transportu zbiorowego przejeżdżający przez skrzyżowanie wyposażony jest w system komunikacji w czasie rzeczywistym ze sterownikiem sygnalizacji świetlnej;
- znane są charakterystyki zużycia paliwa lub energii elektrycznej dla każdego pojazdu przejeżdżającego przez skrzyżowanie;
- znane są charakterystyki uśrednione zużycia paliwa dla każdej uwzględnianej klasy pojazdów indywidualnych.

W przypadku pojazdów transportu zbiorowego zdecydowano się uzależnić koszt zatrzymania przed skrzyżowaniem od czasu zatrzymania i liczby pasażerów w pojeździe. Koszt zatrzymania przed skrzyżowaniem składa się z kosztu czasu oraz kosztu ponownego rozpędzenia pojazdu po zatrzymaniu (zużycie paliwa lub energii elektrycznej oraz inne koszty eksploatacyjne). Funkcja kosztu zatrzymania pojazdu transportu zbiorowego została zapisana w następujący sposób:

$$f(t_{tz}, np) = ((ttz + \max(t_m))/3600 * np * VOT_{tz}) + ZK_{tz}$$

gdzie:

- $ttz$  – czas zatrzymania pojazdu transportu zbiorowego [s],
- $\max(t_m)$  – maksymalny czas międzycielony w cyklu sygnalizacji świetlnej dla analizowanego skrzyżowania [s],
- $np$  – liczba pasażerów w pojeździe [pas.],
- $VOT_{tz}$  – wartość czasu pasażera – transport zbiorowy [PLN/h],
- $ZK_{tz}$  – koszt eksploatacyjny ponownego rozpędzenia pojazdu po zatrzymaniu – transport zbiorowy [PLN].

W powyższej funkcji koszt eksploatacyjny ponownego rozpędzenia pojazdu po zatrzymaniu uzależniony jest od typu pojazdu [12]. Jeżeli wraz z informacją o liczbie pasażerów w pojeździe przesyłana byłaby także informacja o typie taboru, możliwe byłoby dokładniejsze określenie kosztów. W przypadku braku takiej informacji parametr  $ZK_{tz}$  należałoby wyliczyć na podstawie średniego kosztu dla całej eksploatowanej floty pojazdów.

Wartość czasu w powyższej funkcji podawana jest jako stała [8]. Wykonując odpowiednie badania ankietowe, możliwe byłoby sprawdzenie, czy dla pasażerów strata czasu jest tak samo postrzegana w różnych porach dnia. W przypadku uzyskania odpowiedzi od większości z badanych osób, że nie jest tak samo postrzegana, możliwe byłoby określenie wartości czasu, jako funkcji zależności od pory dnia.

Dla pojazdów transportu indywidualnego koszt zatrzymania przed skrzyżowaniem został uzależniony od czasu zatrzymania oraz liczby oczekujących na przejazd pojazdów. Podobnie jak w przypadku pojazdów transportu zbiorowego, koszt zatrzymania składa się z kosztu: straty czasu

oraz ponownego rozpędzenia pojazdów. Funkcja kosztu zatrzymania pojazdów indywidualnych została zapisana w następujący sposób:

$$g(tti, lp) = \sum_{i=1}^n ((tti_i/3600 * lp_i * VOT_{ti}) + (ZK_{ti} * lp_i))$$

gdzie:

$tti_i$  – czas oczekiwania na przejazd przez skrzyżowanie dla pojazdów w i-tej fazie cyklu sygnalizacji świetlnej [s],

$lp_i$  – liczba pojazdów oczekujących na przejazd w i-tej fazie cyklu sygnalizacji świetlnej [poj.],

$VOT_{ti}$  – wartość czasu kierującego pojazdem i pasażerów w pojeździe – transport indywidualny [PLN/h],

$ZK_{ti}$  – koszt eksploatacyjny ponownego rozpędzenia pojazdu po zatrzymaniu – transport indywidualny [PLN].

Ze względu na charakter cyklu sygnalizacji świetlnej – kolejno wyświetlanych faz podjęto decyzje, aby koszty liczyć oddzielnie dla każdej fazy, ponieważ dla każdej z nich będzie inny czas oczekiwania na przejazd. Uwzględniana liczba pojazdów w funkcji to liczba pojazdów oczekujących w momencie detekcji nadjeżdżającego pojazdu transportu zbiorowego.

Koszt ponownego rozpędzenia pojazdu oraz wartość czasu określone zostały jako wartości stałe. W pierwszym przypadku koszt ten określony powinien być na podstawie kosztu średniego dla pojazdu ekwiwalentnego. W przypadku wartości czasu, podobnie jak dla transportu zbiorowego, w celu określenia jej zmienności w czasie należałoby przeprowadzić badania ankietowe wśród kierowców pojazdów indywidualnych.

Obliczenie obu funkcji kosztów umożliwiłoby określenie w chwili detekcji pojazdu transportu zbiorowego, czy pojazd otrzyma priorytet w przejeździe przez skrzyżowanie, czy będzie musiał się zatrzymać. W celu zminimalizowania czasu oczekiwania na sygnał zezwalający na przejazd sterownik sygnalizacji świetlnej powinien wykonywać obliczenia co sekundę, porównując wartości obu funkcji kosztów. W przypadku, gdyby wartość funkcji dla transportu zbiorowego była cały czas niższa niż dla transportu indywidualnego, faza dla transportu zbiorowego uruchamiana byłaby zgodnie z pierwotnym programem sygnalizacji świetlnej.

## Podsumowanie

Przygotowana metoda nadawania priorytetu w przejeździe przez skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną dla pojazdów transportu zbiorowego, w oparciu o kryteria kosztów, liczbę pasażerów w pojeździe oraz liczbę pojazdów indywidualnych, umożliwia bardziej efektywne sterowanie ruchem drogowym pod względem kosztów społecznych transportu. Opracowane funkcje są jedynie bazą dla dalszych prac mających na celu opracowanie ogólnego algorytmu sterowania ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną z priorytetem dla pojazdów transportu zbiorowego.

W celu opracowania metody sterowania ruchem na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną z priorytetem dla transportu zbiorowego planowane jest podjęcie dalszych działań:

- opracowanie modelu symulacyjnego do testowania algorytmu,
- określenie na podstawie badań ankietowych postrzegania wartości czasu przez pasażerów i kierowców oraz określenie zależności pomiędzy postrzeganiem wartości czasu a godziną i dniem tygodnia,
- stworzenie alternatywnych funkcji kosztów oraz przetestowanie ich za pomocą modelu symulacyjnego,
- sprawdzenie możliwości przesyłania informacji zwrotnej przez sterownik sygnalizacji świetlnej w celu zmniejszenia kosztów eksploatacyjnych poprzez zmniejszenie prędkości nadjeżdżającego pojazdu transportu zbiorowego [13].

Na podstawie przeprowadzonych prac można stwierdzić, że ze względu na postępującą degradację środowiska oraz próby minimalizowania strat energii niezbędne jest wprowadzanie rozwiązań, które umożliwią zmniejszenie łącznego zużycia energii w transporcie.

## Literatura

1. Aleksandrowicz J., Piwowarczyk M., *Sposoby detekcji pojazdów transportu zbiorowego i ich funkcjonalność*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 5.
2. Dyrekcja Generalna ds. Polityki Wewnętrznej, Parlament Europejski: *Obliczanie kosztów zewnętrznych w sektorze transportu*, 2009.
3. Pawłowska B., *Koszty zewnętrzne transportu w Polsce*, „Przegląd Naukowy – Inżynieria i Kształtowanie Środowiska”, 2018, nr 27 (1).
4. Burdzik R., Kobot M., Cieśla M., *Podział i internalizacja kosztów zewnętrznych transportu samochodowego*, „Logistyka – nauka”, 2014, nr 4.
5. Klos-Adamkiewicz Z., *Uogólniony koszt podróży na przykładzie wyboru komunikacji miejskiej i samochodu osobowego*, „Problemy Transportu i Logistyki”, 2016, nr 3 (35).
6. Estache A., Rus de G., *Privatization and Regulation of Transport Infrastructure: Guidelines for Policymakers and Regulators*, Washington: The World Bank Institute, 2000.
7. Athira I.C., Muneera C.P., Krishnamurthy K., Anjaneyulu M.V., *Estimation of Value of Travel Time for Work Trips*, *Transportation Research Procedia* 17, 2016.
8. Szarata A., *Ocena efektywności funkcjonalnej parkingów przesiadkowych (P = R)*, praca doktorska, Kraków 2005.
9. Aleksandrowicz J., Starowicz W., *Automatyczne systemy zliczania pasażerów w miejskim transporcie zbiorowym*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2020, nr 6.
10. Aleksandrowicz J., *Przydatność automatycznych systemów zliczania pasażerów w celach predykcji popytu na usługi transportowe*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2018, nr 4.
11. Aleksandrowicz J., *Informowanie pasażerów o wolnych miejscach w pojazdach miejskiego transportu zbiorowego z wykorzystaniem automatycznych systemów zliczania pasażerów*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2019, nr 8.
12. Aleksandrowicz J., *Narzędzia metodologii lean w procesach doskonalenia miejskiego transportu zbiorowego*, „Autobusy: technika, eksploatacja, systemy transportowe”, 2016, nr 12.
13. Aleksandrowicz J., Piwowarczyk M., *Architektura informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy*, „Transport Miejski i Regionalny”, 2016, nr 5.