

Mateusz SZARATA, Piotr OLSZEWSKI

ANALIZA KORZYŚCI WPROWADZENIA DYNAMICZNIE WYDZIELANYCH PASÓW AUTOBUSOWYCH

Streszczenie

Nowoczesne technologie telematyczne umożliwiają wprowadzenie inteligentnego priorytetu dla transportu publicznego w formie dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych. Doświadczenia z innych krajów oraz przeprowadzone wstępne analizy dla miasta Rzeszowa, wykazują duży potencjał DPA. Wprowadzenie wydzielonych pasów autobusowych wymaga wytypowania właściwych odcinków ulic, dla których takie rozwiązanie miałoby sens. Do tego celu potrzebne jest opracowanie narzędzia umożliwiającego już na wstępnym etapie wytypowanie właściwych odcinków. Do realizacji wyznaczonego celu postanowiono wykorzystać model analityczny przedstawiony w podręczniku HCM2010.

WSTĘP

Wprowadzenie wydzielonych pasów autobusowych wymaga przeprowadzenia szeregu analiz, których celem jest wskazanie korzyści z zaproponowanego rozwiązania. W początkowej fazie prac niezbędne jest przyjęcie kryteriów, które umożliwiają wytypowanie potencjalnych odcinków uzasadniających wydzielenie pasa autobusowego. Podstawowym parametrem wykorzystywanym do lokalizacji pasów autobusowych jest natężenie ruchu autobusów i wielkości potoków pasażerskich [1]. Bardziej zaawansowane analizy na tym etapie mogą również uwzględniać układ linii i przystanków, spodziewane koszty inwestycyjne oraz podział zadań przewoźnych [2]. Do końcowej oceny wykorzystuje się szereg parametrów pochodzących z komputerowych modeli mikro-, mezo-, makrosymulacyjnych, których budowa jest skomplikowana i czasochłonna [3]. Wyznaczone w ten sposób korzyści i straty mogą uzasadniać wprowadzenie pasów autobusowych funkcjonujących stale lub tylko w określonych porach porach dnia.

Wykorzystanie nowoczesnych technologii w sterowaniu ruchem drogowym, umożliwi zastosowanie nowego podejścia Dynamicznie Wydzielanych Pasów Autobusowych (DPA) zaproponowanego po raz pierwszy przez J. M. Viegas'a w 2007r [4]. Zastosowanie dynamicznie wydzielanego pasa może zwiększyć zakres stosowalności tej formy priorytetu. Nowe rozwiązanie umożliwia czasowe wydzielanie pasa na żądanie zbliżającego się autobusu. Użytkownicy samochodów indywidualnych korzystają z pełnego przekroju drogowego i tylko w sytuacjach kiedy wydzielenie pasa jest naprawdę konieczne, ten pas jest im "odbierany". W efekcie możliwe jest bardziej precyzyjne uprzywilejowanie transportu publicznego dzięki lepszemu dopasowaniu czasu działania do natężenia autobusów i warunków drogowych. Kolejną istotną zaletą DPA jest możliwość zastosowania tej formy priorytetu w przypadkach, w których kryteria wprowadzenia klasycznego wydzielonego pasa nie zawsze są spełnione. Jak pokazały analizy ekonomiczne [5], DPA może znaleźć uzasadnienie nawet przy niewielkiej liczbie autobusów w godzinie. Dzięki temu większa liczba odcinków mogłaby posiadać priorytety wpływające korzystnie na atrakcyjność danej linii, zwiększając jej punktualność czy skracając czasy przejazdu przez zatłoczone odcinki ulic.

W artykule zaproponowano wykorzystanie modeli analitycznych do przeprowadzenia prac planistycznych związanych z wyborem lokalizacji pasa autobusowego. Opracowany model umożliwi:

- wyznaczenie potencjalnych korzyści lub strat związanych z wprowadzeniem wydzielonych pasów autobusowych (w formie „klasycznej” oraz „dynamicznej”) dla proponowanych odcinków,
 - wskazanie najistotniejszych parametrów wpływających na efektywność wydzielanych pasów autobusowych.
- Ponadto otrzymane wyniki mogą zostać wykorzystane w późniejszym etapie, do walidacji modeli mikrosymulacyjnych.

1. ZAŁOŻENIA DO ANALIZ

Bazując na modelu analitycznym zamieszczonym w Highway Capacity Manual 2010 [6] i instrukcji MOP-SZS-04 [7] postanowiono wyznaczyć straty i oszczędności czasu związane z wprowadzeniem wydzielonych pasów autobusowych na odcinku o przekroju ulicznym z dwoma pasami ruchu w każdym kierunku. Na końcu odcinka przyjęto skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną. Do wyznaczenia strat czasu na skrzyżowaniu przeanalizowano przypadek w którym pasy ruchu do jazdy na wprost są wykorzystywane również przez relacje skrętne bezkolizyjne a udział ruchu na ewentualnych wydzielonych pasach do skrętu jest niewielki i nie wpływa na blokiowanie pasów do jazdy na wprost. Jako zmienne zdefiniowano:

- długość odcinka, która zmieniała się od 200m do 1000m,
- całkowite natężenie ruchu zmieniające się w zakresie 300 E/h do 800 E/h,
- natężenie ruchu autobusów od 9 bus/h do 40 bus/h,
- długość efektywnego sygnału zielonego w cyklu,
- długość cyklu sygnalizacji świetlnej $T=60s$ i $T=90s$.

Na potrzeby obliczeń czasów przejazdu transportu zbiorowego (niezależnie od długości odcinka) przyjęto występowanie 1 przystanku autobusowego generującego całkowite opóźnienia związane z wjazdem, wyjazdem z przystanku i wymianą pasażerów równe 21s. Napelnienie pojazdów osobowych przyjęte do obliczeń wynosiło 1.2 osób na pojazd a autobusów 50 os/bus.

2. WYZNACZENIE STRAT CZASU NA SKRZYŻOWANIU

Do obliczeń warunków ruchu na skrzyżowaniu wykorzystano instrukcję MOP-SZS-04 [7] wydaną przez GDDKiA w 2004r. Przepustowość skrzyżowania obliczono na podstawie natężenia nasycenia (które wg. Instrukcji GDDKiA wynosi 1700E/h) oraz udziału sygnału zielonego efektywnego w całej długości cyklu ($\lambda=0,3$ do $\lambda=0,7$).

$$C = S_0 * \lambda * N \quad (1)$$

Gdzie:

- C- przepustowość obliczeniowej grupy pasów [E/h]
- S₀- natężenie nasycenia [E/h]
- λ- udział efektywnego sygnału zielonego Ge w cyklu T [-]
- N – liczba pasów [-]

Tab. 1 Wpływ zmiany przekroju skrzyżowania na zmianę przepustowości

λ	C (E/h) -1 pas-	C (E/h) -2 pasy-
0,3	510	1020
0,4	680	1360
0,5	850	1700
0,6	1020	2040
0,7	1190	2380

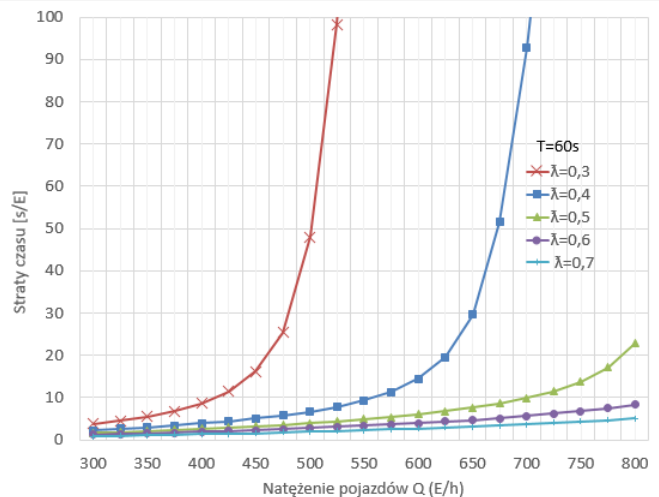
W tabeli 1 zamieszczono wyniki obliczeń przepustowości skrzyżowania w przypadku gdy nie ma wydzielonego pasa autobusowego dochodzącego do skrzyżowania (2 pasy ogólnodostępne) i gdy pas autobusowy został wprowadzony (1 pas ogólnodostępny). Znając przepustowość grupy pasów i długość cyklu rozpoczęto wyznaczanie strat czasu dla założonego zakresu natężenia ruchu (kolejno dla przypadku z jednym i dwoma ogólnodostępnymi pasami ruchu). Straty czasu w obliczeniowej grupie pasów, d_{gr} [s/P], obliczono na podstawie formuły:

$$d_{gr} = f_k * d_1 + d_2 \quad (2)$$

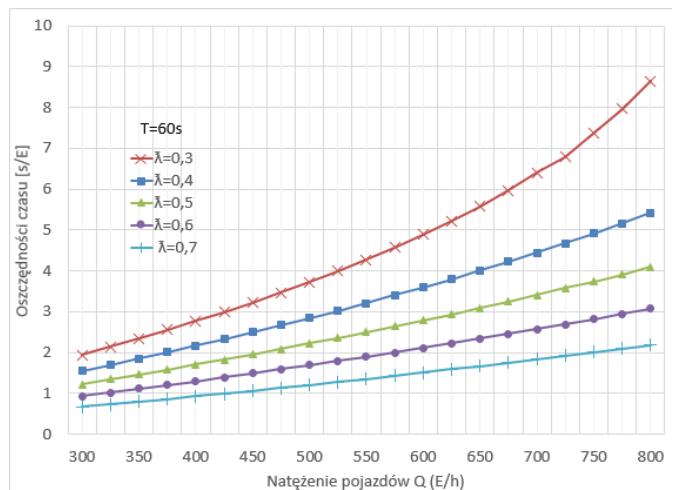
Gdzie:

- f_k- współczynnik koordynacji sygnalizacji [-]
- d₁-straty czasu wynikające z zatrzymań na sygnale czerwonym [s]
- d₂- straty czasu wynikające z losowych wahań ruchu i okresowych przeciążeń [s]

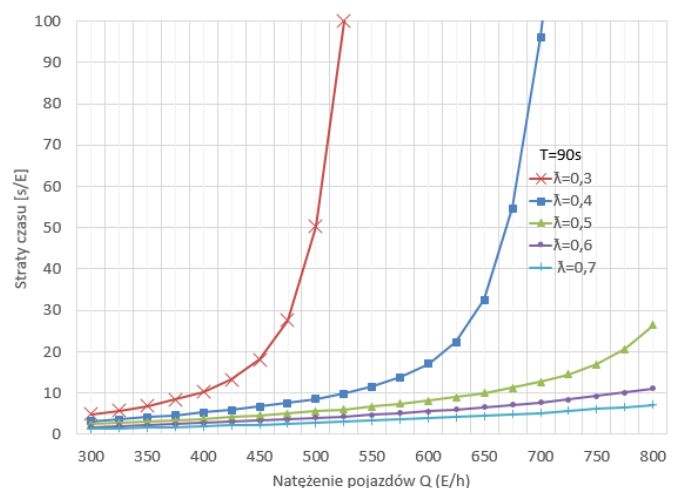
Odejmując straty czasu na skrzyżowaniu w przekroju z dwoma pasami ruchu od strat czasu dla tych samych parametrów w przekroju z 1 pasem ruchu, wyznaczono straty czasu (w transporcie indywidualnym) jakie wystąpią przy zmianie przekroju drogowego z dwóch pasów na jeden pas. Oszczędności czasu (w transporcie publicznym) wyznaczono biorąc różnicę strat czasu przy minimalnym natężeniu pojazdów (równym 5 E/h) i straty czasu obliczone dla przekroju z 2 pasami ruchu. Wyniki przedstawiają poniższe rysunki 1-4. W przypadku skrajnie krótkiego sygnału zielonego (λ =0.3-0.4) na skrzyżowaniu dla analizowanego wlotu oraz natężenia ruchu powyżej 500-600 p/h straty czasu wielokrotnie przewyższają możliwe korzyści w transporcie publicznym. Zwiększenie długości sygnału zielonego w cyklu wyraźnie zmniejsza straty czasu w transporcie indywidualnym.



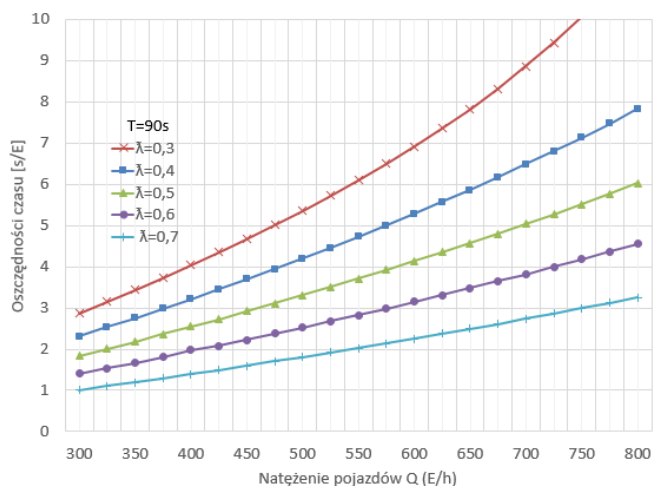
Rys. 1 straty czasu w transporcie indywidualnym przy zmniejszeniu liczby pasów ruchu 2 na 1 (T=60s)



Rys. 2 Oszczędności czasu w transporcie publicznym przy zmniejszeniu liczby pasów ruchu 2 na 1 (T=60s)



Rys. 3 Straty czasu w transporcie indywidualnym przy zmniejszeniu liczby pasów ruchu 2 na 1 (T=90s)



Rys. 4 Oszczędności czasu w transporcie publicznym przy zmniejszeniu liczby pasów ruchu 2 na 1 (T=90s)

3. WYZNACZENIE CZASU PRZEJAZDU

Zastosowanie podręcznika HCM 2010 do obliczeń czasów przejazdu wymaga wykonania analiz osobno dla pojazdów indywidualnych i transportu zbiorowego. W przypadku transportu prywatnego czas przejazdu jest składową czasu jazdy oraz strat czasu na skrzyżowaniu. W transporcie publicznym niezbędne do wyznaczenia poza czasem przejazdu i stratami czasu na skrzyżowaniu, jest czas związany z wjazdem na zatokę, wymianą pasażerów i czasem potrzebnym do włączenia się do ruchu. Obliczenia rozpoczęto się od ustalenia prędkości w ruchu swobodnym, s_{10} [km/h], zgodnie z równaniem:

$$S_{fo} = (S_0 + f_{sc} + f_A) * (1,02 - 4,7 * \frac{(S_0 + f_{sc} + f_A) - 19,5}{\max(L, 400)}) \quad (3)$$

gdzie:

- S_0 -Wyjściowa prędkość w ruchu swobodnym [km/h]
- f_{cs} -Wsp. Korygujący związany z przekrojem drogi [-]
- f_A -Wsp. Korygujący związany z liczbą pasów [-]
- L -Długość odcinka pomiędzy skrzyżowaniami [m]

W kolejnym kroku wyznaczono czas podróży t [s] za pomocą równania (4). Zależy on m.in. od liczby pasów, długości odcinka, natężenia ruchu, liczby zjazdów, rodzaju skrzyżowania, które znajdują się na początku odcinka oraz liczby przejść dla pieszych.

$$t = \frac{6 - l_1}{0,0082 * L} * f_x + \frac{3,6 * L}{S_f} * f_v + \sum_{i=1}^{N_{ap}} d_{ap} + d_{other} \quad (4)$$

gdzie:

- l_1 - strata czasu przy ruszaniu na początku odcinka [s]
- L - długość odcinka między skrzyżowaniami [m]
- f_x - współczynnik korygujący związany z rodzajem sterowania na skrzyżowaniu [-]
- S_f - prędkość w ruchu swobodnym [km/h]
- f_v współczynnik korygujący związany z natężeniem ruchu, przekrojem i prędkością w ruchu swobodnym [-]
- N_{ap} – liczba punktów wpływających na opóźnienia w czasie podróży,
- d_{ap} - straty czasu związane z występowaniem zjazdów, skrzyżowań podporządkowanych, punktów do nawracania [s]
- d_{other} – straty czasu związane z występowaniem parkingów przykrawężnikowych, przejść dla pieszych i innych [s]

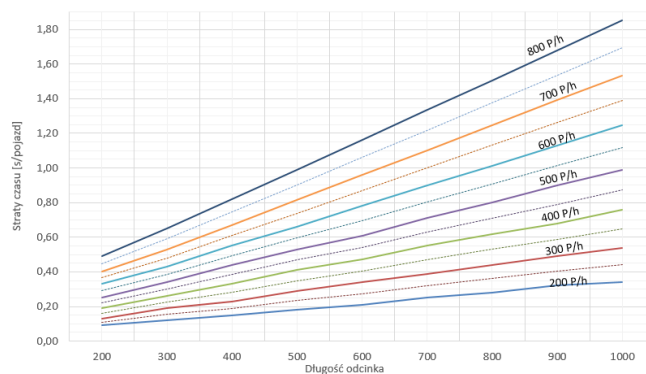
Średnią prędkość komunikacyjną autobusów (t_{Rt} [s]) wyznaczono z równania (5):

$$t_{Rt} = \frac{3,6 * L}{S_{Rt}} + \sum_{i=1}^{N_{ts}} d_{ts} \quad (5)$$

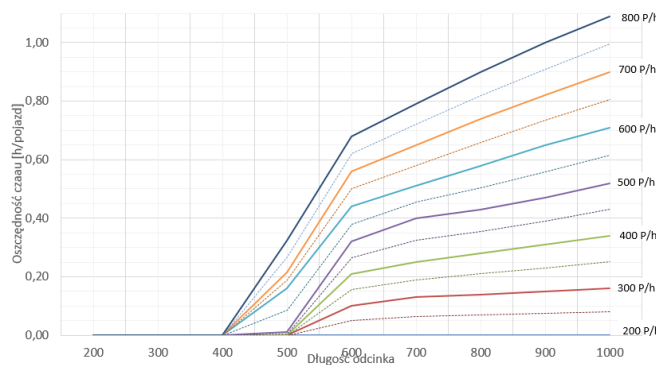
gdzie:

- S_{Rt} - prędkość jazdy autobusów [km/h]
- N_{ts} - liczba wszystkich rodzajów opóźnień [-],
- $d_{ts,i}$ –opóźnienia związane z hamowaniem przed przystankiem, wymianą pasażerów i włączeniem się do ruchu [s].

Wprowadzając kolejno poszczególne długości odcinka i natężenie ruchu otrzymano czasy przejazdu dla przyjętych przekrojów ulicznych. Straty i oszczędności czasu na odcinku zostały wyznaczone tak samo jak miało to miejsce w przypadku strat czasu na skrzyżowaniu. Wyniki prac przedstawiono na rysunku 5 i 6.



Rys. 5 Wpływ długości odcinka i natężenia ruchu na straty czasu



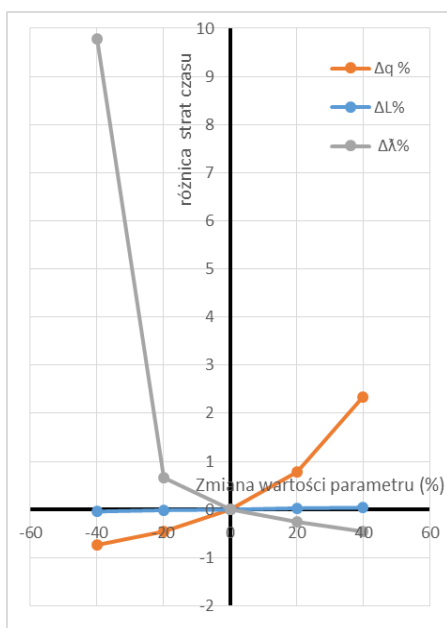
Rys. 6 Wpływ długości odcinka i natężenia ruchu na oszczędności czasu

Opracowane wykresy pozwalają zauważyć, że decydujący wpływ na wzrost strat czasu ma natężenie ruchu co jest szczególnie zauważalne w przypadku dłuższych odcinków. W przypadku oszczędności czasu w transporcie publicznym model nie wykazywał zmian w czasie przejazdu przy małych natężeniach ruchu poniżej 400- 500 p/h co spowodowało przebieg wykresu niezależnie od natężenia ruchu na linii zerowej dla odcinków o długości od 200m do 400m.

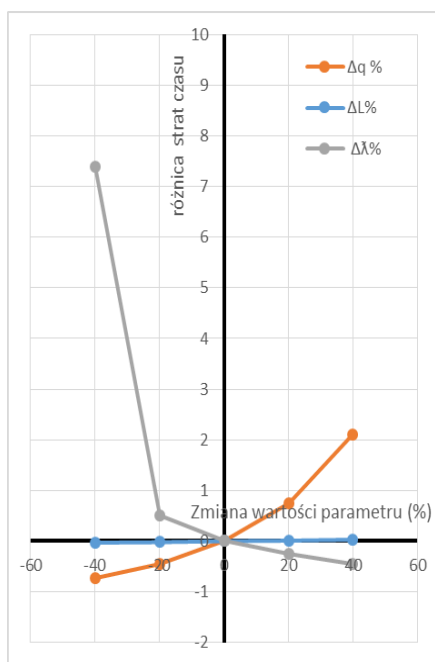
4. ANALIZA WRAŻLIWOŚCI CZYNNIKÓW WPŁYWAJĄCYCH NA ZMIANĘ WARTOŚCI STRAT CZASU

Opracowany model umożliwia przeprowadzenie analizy wrażliwości, dzięki której możliwe jest sprawdzenie wpływu poszczególnych współczynników na końcowe straty czasu uwzględniające łącznie straty czasu związane z przejazdem oraz straty czasu na

skrzyżowaniu. Jako wartość wyjściową w analizie wrażliwości wybrano warunki o natężeniu 500 E/h, długość odcinka 500m i udział sygnału zielonego efektywnego w cyklu równy 0,5. Następnie zmniejszano i zwiększano wartość kolejno dla każdego parametru o 20%. W ten sposób wyznaczono zmiany strat czasu w stosunku do wartości wyjściowej. Wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 7.



Rys. 7. a) Wpływ zmiany wartości przyjętego parametru na straty czasu $T=60s$



Rys. 7. b) Wpływ zmiany wartości przyjętego parametru na straty czasu $T=90s$

Przeprowadzona analiza wrażliwości pokazała, że nie ma jednego wiodącego parametru wpływającego na końcowy wynik strat czasu. Przy zmianie parametrów nieprzekraczającej 20% od wartości wyjściowej decydujący wpływ na zmianę wartości strat czasu będą miały kolejno zwiększenie natężenia ruchu i skrócenie sygnału zielonego efektywnego w przyjętym cyklu.

Zmiana parametrów wyjściowych powyżej 20% pokazała, że najmocniej na straty czasu będzie oddziaływać parametr λ w przy-

padku skrócenia udziału wyświetlania sygnału zielonego w cyklu. Niezauważalny wpływ na końcowy wynik strat czasu w całym zakresie będzie miał parametr związany ze zmianą długości odcinka. Zmiana długości cyklu najmocniej wpływa na parametr λ , który przy wydłużeniu długości cyklu o 50%, w skrajnym przypadku może zostać zmniejszony o 25%.

5. ANALIZA KORZYŚCI

Przeprowadzone obliczenia umożliwiły w końcowym etapie na porównanie czasu przejazdu pojazdów indywidualnych oraz autobusów w przypadku gdy mają do dyspozycji pełny przekrój drogi oraz gdy zostanie wydzielony z niego jeden pas dla autobusów. Można przyjąć że, wprowadzenie pasów autobusowych będzie uzasadnione wtedy gdy straty czasu w transporcie prywatnym będą mniejsze od oszczędności czasu w transporcie publicznym. Dlatego końcowy bilans został wyznaczony za pomocą następującego równania:

$$TP - TI > 0 \quad (6)$$

gdzie:

TP - oszczędność czasu w przewozach pasażerskich [h]

TI - straty czasu w transporcie indywidualnym [h]

$$TP = \frac{|\Delta t_{TP}| * Q_{TP} * N_{TP}}{3600} \quad (7)$$

gdzie :

Δt_{TP} - różnica średnich czasów przejazdu autobusów w wariancie 1 i wariancie 0 [s]

Q_{TP} - liczba autobusów w godzinie szczytu [=]

N_{TP} - średnie napelnienie autobusów [os/bus]

$$TI = \frac{|\Delta t_{TI}| * Q_{TI} * N_{TI}}{3600} \quad (8)$$

gdzie :

Δt_{TI} - różnica średnich czasów przejazdu pojazdem indywidualnym w wariancie 0 i wariancie 1 [s]

Q_{TI} - natężenie ruchu w godzinie szczytu [E]

N_{TI} - średnie napelnienie pojazdu osobowego [os/E]

W rozważaniach uwzględniających wprowadzenie dynamicznego pasa dojedzie jeszcze jeden parametr związany z udziałem czasu aktywnego pasa w godzinie umożliwiającą uprzywilejowany przejazd wzdłuż odcinka. Całkowity czas wydzielenia pasa autobusowego umożliwiającego przejazd pojedynczego autobusu można wyznaczyć z równania:

$$T_c = t_{op} + t_s + t_z \quad (9)$$

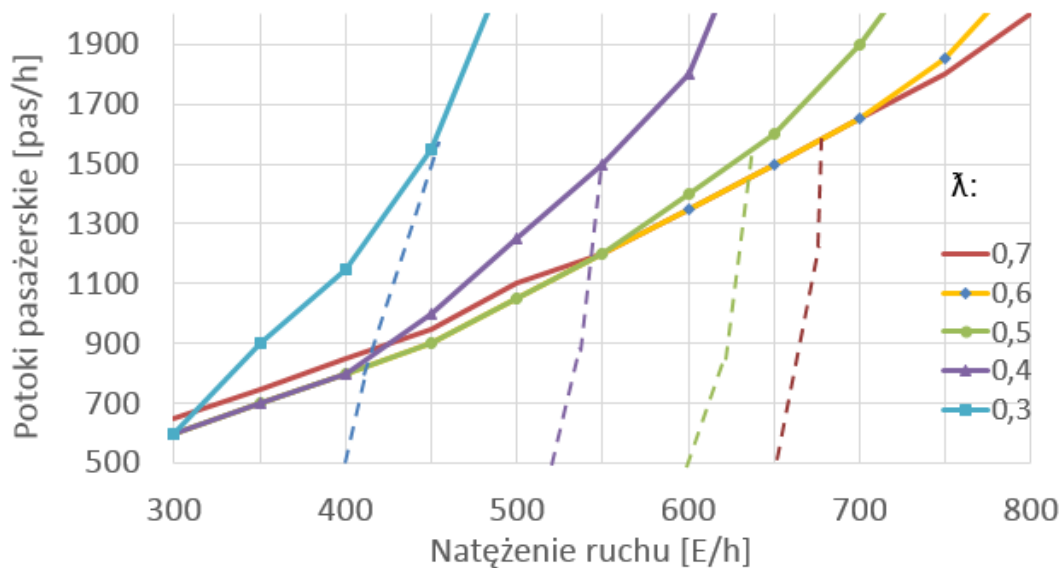
gdzie:

T_c -całkowity czas wydzielania [s]

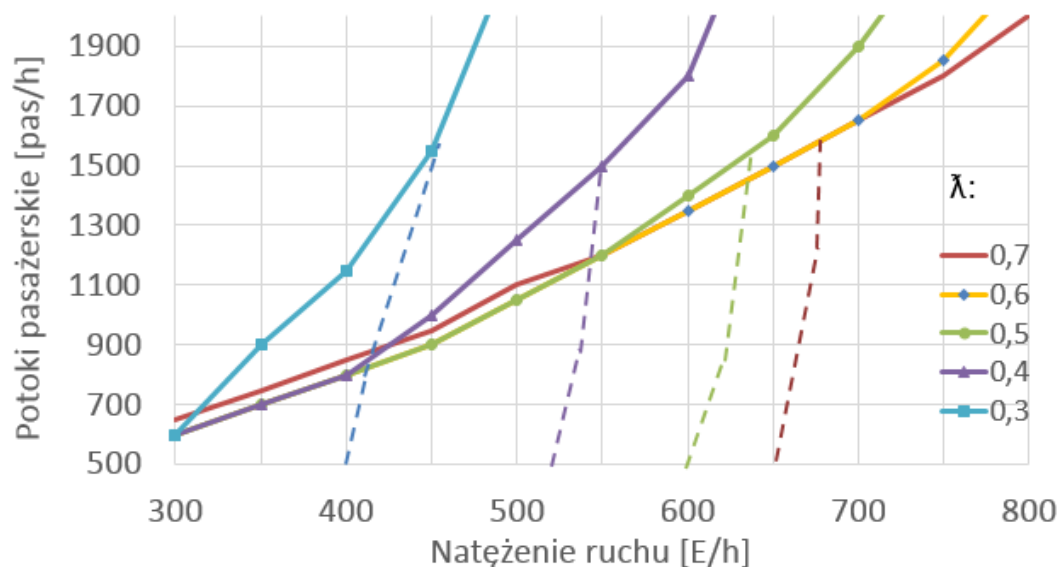
t_{op} - czas potrzebny na oczyszczenie wydzielanego pasa ruchu [s]

t_s -czas przejazdu [s]

t_z -czas oczekiwania na kolejne zgłoszenie [s]



Rys. 8 Krzywe graniczne dla wprowadzenia wydzielonych pasów autobusowych w różnych wariantach.



Rys. 10 Krzywe graniczne dla wprowadzenia wydzielonych pasów autobusowych w różnych wariantach.

W analizach korzyści postanowiono uwzględnić wpływ natężenia ruchu pojazdów osobowych i autobusów, czas trwania sygnału zielonego w cyklu oraz długość cyklu. Na podstawie analizy wrażliwości zrezygnowano z parametru określającego długość odcinka. Przeprowadzenie analizy korzyści polegało na wyznaczeniu takiej wartości potoków pasażerskich dla poszczególnych przedziałów natężenia ruchu samochodów prywatnych, dla której oszczędności czasu równoważyły się ze stratami czasu spowodowanymi zmniejszeniem przekroju drogowego. Dzięki temu możliwe było wyznaczenie granicznych wartości po przekroczeniu których wprowadzenie pasa autobusowego jest korzystne. Takie samo podejście zastosowano w przypadku dynamicznie wydzielanego pasa autobusowego gdzie do wyznaczenia granicznych wartości przyjęto przypadek najmniej korzystny, w którym czas wydzielania pasa umożliwił przejazd tylko jednemu autobusowi.

Linie ciągle przedstawione na wykresach 9 i 10 oznaczają graniczne wartości powyżej których wydzielenie pasów autobusowych w wersji klasycznej jest opłacalne (linie przerywane oznaczają graniczną wartość dla zastosowania dynamicznego pasa autobusowego). Dynamicznie wydzielany pas autobusowy pozwala zwiększyć

zakres stosowalności tej formy priorytetu szczególnie przy mniejszej wielkości potoków pasażerskich. Opracowane wykresy pokazują, że niekorzystne ustawienie sygnalizacji świetlnej (krótki sygnał zielony efektywny), może znacząco ograniczyć efektywność tej formy priorytetu zarówno w wersji klasycznej jak i dynamicznej. Na otrzymane wyniki wyraźnie wpływa długość cyklu sygnalizacji świetlnej, którego zwiększanie wpłynie korzystnie na uzasadnienie wprowadzenia pasów autobusowych.

PODSUMOWANIE

Opracowany model analityczny umożliwia przeprowadzenie analizy korzyści wynikających z wprowadzenia pasów autobusowych w wyznaczonych ramach. Dzięki niemu w szybki sposób możliwe jest wytypowanie odcinków oraz wybór odpowiedniej formy priorytetu a otrzymane wyniki mogą zostać wykorzystane do walidacji komputerowych modeli symulacyjnych. Na podstawie przeprowadzonej analizy wrażliwości wytypowano najważniejsze parametry mające wpływ na oszczędności i straty czasu. Opracowana analiza wrażliwości pokazała, że na końcowy wynik istotny wpływ będzie

mieć wielkość potoków pasażerskich oraz parametry wpływające na warunki ruchu na skrzyżowaniu (w tym długość cyklu i sygnału zielonego efektywnego oraz natężenie ruchu). Przeprowadzona analiza pokazała, że DPA mogą stanowić alternatywę dla klasycznego podejścia, wydzielając pas wtedy kiedy będzie taka potrzeba umożliwiając sprawny przejazd autobusom oraz minimalizować straty czasu w transporcie prywatnym. Ponadto opracowane wykresy dla analizy korzyści pokazały, że DPA może znaleźć zastosowanie w sytuacjach, w których potoki pasażerskie nie uzasadniają wprowadzenia klasycznego pasa autobusowego wydzielonego na stałe. Przeprowadzona analiza wprowadzenia DPA uwzględniła najmniej korzystny przypadek wykorzystania aktywnego pasa. Zwiększenie korzyści tego rozwiązania będzie możliwe w przypadku zwiększenia lp. autobusów wykorzystujących ten sam okres aktywacji pasa autobusowego lub większego napelnienia autobusów.

BIBLIOGRAFIA

1. *Buspasy - wyniki analiz prowadzonych w ramach projektu CIVITAS DYN@MO*, www.mobilnagdynia.pl , 2015
2. *STUDIUM MOŻLIWOŚCI UPRZYWILEJOWANIA KOMUNIKACJI AUTOBUSOWEJ W WARSZAWIE*, TransEko ,Warszawa 2008
3. Szarata M.: *Wybrane metody modelowania dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych*, Transport Miejski I Regionalny, 12/2014.
4. Viegas J.M., Roque R., Lu B., Vieira J. (2007) *The Intermittent Bus lane System: demonstration in Lisbon*, 86th Transportation Research Board Annual Meeting, Washington, DC. 2007
5. Szarata M., Olszewski P., Bichajło L.: *Analiza ekonomiczna zastosowania dynamicznie wydzielanych pasów autobusowych*, Czasopismo Logistyka; 6/2016
6. Highway Capacity Manual 2010, Transportation Research Board. National Academy of Sciences.
7. *Metoda Oceny Przepustowości Skrzyżowań z Sygnalizacją Świetlną*, GDDKiA , Warszwa 2004

BENEFITS ANALYSIS OF INTRODUCING STANDARD BUS LANE AND BUS LANE WITH INTERMITTENT PRIORITY

Abstract

The paper compares benefits of bus lane with intermittent priority and standard bus lane. The study was based on traffic models made using HCM 2010 method.. The analysis shows that compared to the standard bus lane, the use of bus lane with intermittent priority can bring benefits for streets with lower bus flows.

Autorzy:

Piotr Olszewski – Zakład Inżynierii Komunikacyjnej, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Warszawska, e-mail: P.Olszewski@il.pw.edu.pl

Mateusz Szarata – Zakład Dróg i Mostów, Wydział Budownictwa i Inżynierii Lądowej, Politechnika Rzeszowska, e-mail: mat-sza@prz.edu.pl