

MAREK BAUER

dr inż., Politechnika Krakowska,
Katedra Systemów Komunikacyjnych,
ul. Warszawska 24, 31-155
Kraków, tel. 12 628 25 33,
mail: mbauer@pk.edu.pl

ZAKŁÓCENIA CZASU PRZEJAZDU AUTOBUSÓW KORZYSTAJĄCYCH Z WYDZIELONYCH PASÓW RUCHU NA WLOTACH SKRZYŻOWAŃ Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA¹

Streszczenie. W artykule przedstawiono ogólny opis zjawisk powstawania i nakładania się zakłóceń na liniach autobusowych. Zaprezentowano przykładowe wyniki badań własnych prędkości komunikacyjnych na ciągach z pasami autobusowymi w Krakowie, z których wynika, że zakłócenia czasu przejazdu powstają nawet wtedy, gdy autobusy korzystają z wydzielonych pasów ruchu. Dlatego w dalszej części artykułu podjęto próbę wyspecyfikowania czynników wpływających na straty czasu autobusów na wydzielonych pasach. W pierwszej kolejności wyodrębniono czynniki losowe, związane głównie z ruchem autobusów i innych pojazdów oraz przemieszczeniami pasażerów, a także czynniki behawioralne i środowiskowe. Przedstawiono również czynniki o deterministycznym charakterze oddziaływania, związane z infrastrukturą pasów autobusowych i pozostałych elementów ulic, a także związane z organizacją ruchu i organizacją przewozów. Większą uwagę poświęcono problemowi strat czasu autobusów na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. Przeprowadzono dyskusję przyczyn powstawania strat czasu, a następnie zaprezentowano regresyjne modele do wyznaczania czasu rozładowania kolejki na pasie autobusowym na wlocie skrzyżowania oraz czasu przejazdu w kolejce, w zależności od długości tej kolejki. Choć modele te mają wstępny charakter i w obecnej postaci nie są w pełni reprezentatywne dla opisu zjawiska – dają dobry pogląd na jego skalę. W referacie przedstawiono także ogólne rozwiązania infrastrukturalne i organizacji ruchu, służące skróceniu kolejek na pasach autobusowych na wlotach skrzyżowań.

Słowa kluczowe: transport pasażerski, transport zbiorowy, pasy autobusowe

Niepunktualność jako jeden ze skutków zakłóceń na linii autobusowej

Zakłócenia ruchu autobusów powstałe w wyniku złożonego oddziaływania czynników zewnętrznych dotyczą niemal wszystkich aspektów funkcjonowania linii. Są jednak szczególnie odczuwalne w przypadku cech niezawodnościowych, takich jak: czas i prędkość przejazdu oraz punktualności kursowania.

Zakłócenia powstają w wyniku zbyt długich lub zbyt krótkich czasów przejazdu kolejnych odcinków oraz czasów postoju na przystankach, w stosunku do odpowiadających im czasów przewidzianych w rozkładzie jazdy. O ile, zbyt wczesnym odjazdem z przystanków można zaradzić poprzez układanie realistycznych rozkładów jazdy oraz egzekwowanie dyscypliny prowadzących pojazdy, o tyle w przypadku opóźnień odjazdów często nie ma możliwości skutecznego im przeciwdziałania.

Dotrzymanie idealnej punktualności nie jest jednak ani możliwe, ani konieczne. Zakłócenia pojawiają się na każ-

dym odcinku linii, ale dopóki nie przekraczają ustalonych granic tolerancji (akceptowanych przez pasażerów), ich konsekwencje są znikome. Najbardziej uniwersalną miarą punktualności jest odchyłka od rozkładu jazdy [1], definiowana jako różnica pomiędzy czasem odjazdu przewidzianym w rozkładzie jazdy a rzeczywistym czasem odjazdu z przystanku:

$$d = t_r - t_e$$

Przy tak zdefiniowanej odchyłce od rozkładu jazdy wartości dodatnie odpowiadają przyspieszonym, natomiast wartości ujemne – opóźnionym odjazdom z przystanków. Wielkości odchyłek zmieniają się wraz ze zmianą położenia pojazdu. Zmianom mogą ulegać nie tylko wartości bezwzględne odchyłek, ale również ich znaki. Mechanizm zmian wielkości odchyłki od rozkładu jazdy można opisać równaniem:

$$d_{i+1} = d_i + \Delta d_{i,i+1}$$

gdzie:

$d_i, d_{i,i+1}$ – wartości odchyłek od rozkładu jazdy na dwóch kolejnych przystankach,

$\Delta d_{i,i+1}$ – przyrost odchyłki od rozkładu jazdy pomiędzy kolejnymi przystankami.

Powstawanie zakłóceń na kolejnych odcinkach (przystankach) linii, w połączeniu z **przenoszeniem zakłóceń** z odcinków (przystanków) poprzednich, prowadzi do szczególnie niekorzystnego zjawiska **narastania zakłóceń** punktualności, co niejednokrotnie prowadzi do całkowitego jej załamania [2] i [3]. O ile nabyte przyspieszenia względem rozkładu jazdy są stosunkowo łatwe do **eliminowania** na dalszych odcinkach linii, o tyle niwelowanie znacznych opóźnień jest możliwe tylko przez sztuczne wydłużanie rozkładowych czasów przejazdu, co nie stanowi skutecznego rozwiązania problemu, gdyż skutkuje zmniejszeniem prędkości przejazdu pojazdów punktualnych i nie jest akceptowane przez pasażerów.

Zjawiska powstawania, przenoszenia, narastania i eliminowania zakłóceń punktualności można zdefiniować następująco:

- powstawanie zakłóceń punktualności – podczas przejazdu odcinka międzyprzystankowego lub podczas postoju na przystanku, w wyniku działania czynników o charakterze zakłócającym, co można zapisać warunkiem:

$$d_i = 0 \wedge \Delta d_{i,i+1} \neq 0$$

- przenoszenie zakłóceń punktualności – podczas przejazdu odcinka lub podczas postoju autobusu na przystanku są przenoszone na kolejny odcinek trasy, nie będący źródłem kolejnych zakłóceń:

$$d_i \neq 0 \wedge \Delta d_{i,i+1} = 0$$

- narastanie zakłóceń punktualności – jest to zjawisko o mechanizmie powstawania zbliżonym do przeniesienia zakłóceń, z tą różnicą, że zakłócenia powstają podczas przejazdu odcinka oraz/lub podczas postoju na przystanku, w efekcie czego, następuje ich kumulacja:

$$d_i \neq 0 \wedge \Delta d_{i,i+1} \neq 0 \wedge d_i \cdot \Delta d_{i,i+1} > 0$$

- eliminowanie zakłóceń punktualności – jest to zjawisko polegające na wzajemnym równoważeniu się opóźnień i przyspieszeń odjazdów:

$$d_i \neq 0 \wedge \Delta d_{i,i+1} \neq 0 \wedge d_i \cdot \Delta d_{i,i+1} < 0.$$

Jednak w praktyce, przy dobrze ułożonym rozkładzie jazdy, istotne eliminowanie zakłóceń punktualności nie powinno być możliwe. Oznaczałoby to bowiem, że czas rozkładowy jest zbyt długi i w przypadku braku zakłóceń na wcześniejszych odcinkach mogłoby dochodzić do przypadków przyspieszeń, które nie powinny mieć miejsca ze względu na szczególną uciążliwość dla pasażerów oczekujących na przystankach.

Zakłócenia na odcinkach z pasami autobusowymi

Wydzielone pasy autobusowe należą do efektywnych środków uprzywilejowania pojazdów transportu zbiorowego. Warunki przejazdu autobusów po wydzielonych pasach są znacznie korzystniejsze niż w przypadku pasów wykorzystywanych przez ogół pojazdów. Umożliwiają osiągnięcie wyższych prędkości przejazdu, sprzyjają poprawie punktualności i regularności kursowania autobusów. Tym samym zwiększają atrakcyjność transportu zbiorowego, co przekłada się na zwiększenie liczby pasażerów podróżujących liniami korzystającymi z wydzielonych pasów ruchu. Jednak nawet w przypadku wydzielenia pasa ruchu zachowanie jednolitych, korzystnych warunków przejazdu autobusów – w wielu przypadkach nie jest możliwe. W tabeli 1 przedstawiono charakterystyki prędkości komunikacyjnych autobusów na ciągach z wydzielonymi pasami ruchu, wyznaczone na podstawie badań własnych.

Prędkości komunikacyjne na powyższych ciągach są zdecydowanie wyższe od prędkości, które byłyby osiągane, gdyby pasów autobusowych nie było, a autobusy poruszałyby się po pasach ogólnodostępnych, w strumieniu innych pojazdów. Jednak ich wartości średnie (także wielkości odchyłeń standardowych) wskazują, że potencjał pasów autobusowych nie jest w pełni wykorzystywany. Należało by się spodziewać, że średnie prędkości komunikacyjne (nawet na ciągu tak silnie obciążonym ruchem pojazdów transportu zbiorowego) powinny wynosić przynajmniej 20 km/h. Należy się więc zastanowić, jakie są tego przyczyny – konkretnie, jakie czynniki wpływają na zakłócenia ruchu autobusów po wydzielonych pasach ruchu i w jaki sposób można im przeciwdziałać.

Tabela 1

Prędkości komunikacyjne autobusów na wybranych ciągach z wydzielonymi pasami ruchu w Krakowie (na podstawie badań własnych)			
Odcinek	Pora dnia	Prędkość komunikacyjna [km/h]	
		Średnia	Odchylenie standardowe
Al. Trzech Wieszczów (kier.: Warszawa), długość: 3,4 km, w tym 3,2 km pasa autobusowego (PA), (pomiarzy w roku 2010)	6:00–10:00	14,4	1,7
Al. Trzech Wieszczów (kier.: Zakopane), długość: 3,3 km, w tym 3,3 km PA (2010)	6:00–10:00	18,9	1,8
Al. 29-go Listopada (kier.: Warszawa), długość: 0,81 km, w tym 0,81 km PA (2011)	6:00–10:00	23,3	4,4
	14:00–18:00	19,2	3,7
Al. 29-go Listopada (kier.: Zakopane), długość: 0,84 km, w tym 0,84 km PA (2011)	6:00–10:00	18,5	2,6
	14:00–18:00	19,5	3,1

Czynniki wpływające na zakłócenia przejazdu autobusów po wydzielonych pasach ruchu

Istnieje wiele czynników, które w mniejszym lub większym stopniu oddziałują na funkcjonowanie linii autobusowych korzystających z wydzielonych pasów ruchu. Czynniki te ([2], [4], [5], [6]) mogą się charakteryzować zarówno długotrwałym, jak i krótkotrwałym oddziaływaniem na ruch autobusów. Znaczna część czynników ma z natury charakter losowy i to one w dużej mierze odpowiadają za występowanie zakłóceń przejazdu. Należą do nich:

- czynniki związane z ruchem pojazdów po wydzielonych pasach – jest to grupa czynników o największym wpływie na warunki ruchu autobusów na odcinkach oraz w obrębie skrzyżowań i przystanków: wielkość, zmienność i struktura natężeń ruchu autobusów i innych pojazdów transportu zbiorowego (ewentualnie taksówek i innych uprawnionych do korzystania z pasa), wielkość, zmienność i struktura natężeń ruchu pojazdów korzystających z pasa na wlocie skrzyżowania w celu wykonania relacji skrętnej w prawo, a także wielkość aktualnego przyspieszenia lub opóźnienia względem rozkładu jazdy – motywujące do wolniejszej lub szybszej jazdy;
- czynniki związane z przemieszczeniami pasażerów – jest to grupa czynników o największym stopniu losowości i zmienności, wpływających głównie na długość czasu wymiany pasażerów na przystankach, są

to: wielkość i zmienność potoków pasażerów wysiadających (także tylko w celu ułatwienia wyjścia innym pasażerom) i wsiadających oraz znajdujących się w pojeździe podjeżdżającym na przystanek;

- czynniki behawioralne, obejmujące zachowania wszystkich uczestników ruchu, w tym kierowców autobusów oraz innych pojazdów (poziom umiejętności, dyscyplina, cechy psychofizyczne), a także czynniki motywujące do;
- czynniki środowiskowe, do których należą: pora roku i dnia, rodzaj dnia, warunki atmosferyczne.

Zakłócenia mogą wynikać także z działania czynników o bezpośrednim deterministycznym charakterze oddziaływania, które same w sobie nie są źródłami zakłóceń, przeciwnie – reprezentują rozwiązania, które w zamierzeniu sprzyjają funkcjonowaniu komunikacji autobusowej. Wpływ czynników deterministycznych na zakłócenia wynika najczęściej bądź z niewystarczającego zakresu i konsekwencji stosowania poszczególnych rozwiązań infrastrukturalnych, bądź z ich małej odporności na nasilenie działania czynników losowych. Zakłócenia mogą też być efektem przyjęcia organizacji ruchu w sposób niewystarczający promującej pojazdy transportu zbiorowego, a także z niewłaściwego planowania przewozów. Ogólnie, czynniki deterministyczne można sklasyfikować następująco:

- czynniki związane z infrastrukturą pasów autobusowych, takie jak: szerokość pasa, zakres i sposób jego oddzielenia od pasów ogólnodostępnych (za pomocą oznakowania lub dodatkowo z wykorzystaniem separatorów);
- czynniki związane z pozostałymi elementami infrastruktury ulic z pasami autobusowymi: liczba i szerokości pasów ruchu w przekroju ulicy, liczba skrzyżowań z sygnalizacją świetlną i bez sygnalizacji, liczba i rozmieszczenie wydzielonych przejść dla pieszych, ewentualne występowanie torowiska tramwajowego w środkowej części jezdni, istotne w przypadku występowania przystanków tramwajowych, na których wymiana pasażerów odbywa się z wykorzystaniem jezdni;
- czynniki związane z infrastrukturą skrzyżowań i przystanków zlokalizowanych na pasach autobusowych, takie jak: rodzaj organizacji ruchu na skrzyżowaniu, sposób przeprowadzenia relacji kolizyjnych, liczba pasów ruchu (szczególnie na wlocie), lokalizacja przystanku względem najbliższego skrzyżowania (na wlocie, tuż przed wlotem, na wylocie, poza zasięgiem skrzyżowania), występowanie i ewentualnie odległość linii zatrzymań autobusów względem wiaty przystankowej, pozycja stanowiska postojowego liczona od czoła przystanku, liczba i lokalizacja stanowisk oraz szerokości peronów przystankowych, lokalizacja przejść dla pieszych;
- czynniki związane z organizacją ruchu, szczególnie na wlotach skrzyżowań: sposób organizacji ruchu na skrzyżowaniu, w tym rodzaj sterowania, zakres i spo-

sób przyznawania priorytetów w sygnalizacji świetlnej, jakość oznakowania, monitoring dostępności wydzielonego pasa ruchu;

- czynniki związane z organizacją przewozów, obejmujące: częstotliwości kursowania autobusów i innych pojazdów transportu zbiorowego, poziom realistyczności rozkładów jazdy, skalę i zakres sterowania dyspozytorskiego, częstość kontroli jakości usług przewozowych, sposób dystrybucji biletów w pojeździe (automat biletowy w pojeździe, sprzedaż biletów przez kierowcę);
- czynniki taborowe – charakterystyki techniczne taboru, mające wpływ na osiągnięcie i utrzymanie pożądanej prędkości jazdy na odcinku (zdolność do przyspieszania i hamowania) oraz na sprawność procesu wymiany pasażerów (pojemność pojazdu, wysokość poziomu podłogi w obrębie wejść oraz w pozostałych częściach pojazdu, liczba i szerokość drzwi, liczba stopni wejściowych, struktura i rozmieszczenie miejsc siedzących i stojących, awaryjność pojazdów).

Jak widać, istnieje spora grupa czynników wpływających na ruch autobusów po wydzielonych pasach. Niektóre wpływy (np.: cechy psychofizyczne i motoryczne kierujących pojazdami) są niemal całkowicie niemierzalne w warunkach rzeczywistych, z kolei inne (np.: liczba pasażerów ustępujących miejsca, wysiadającym na przystankach) niełatwe do zbadania ze względu na techniczne trudności w przeprowadzeniu odpowiednio dokładnych pomiarów na wystarczającą skalę. Nieczęsto się zdarza, aby zakłócenia przejazdu autobusów wynikały z działania jednego czynnika, łatwego do wyodrębnienia. Najczęściej jest to skumulowany efekt działania wielu czynników. W niniejszym referacie przeanalizowano problem strat czasu autobusów w kolejkach na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną.

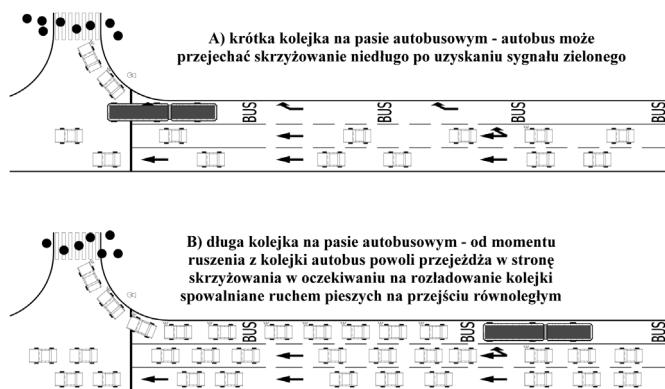
Zbyt długie odcinki dostępne dla ogółu pojazdów na pasach autobusowych na wlotach skrzyżowań z sygnalizacją świetlną

Wydzielenie pasa autobusowego przykrawężnikowego prawego, z którego mogą korzystać pojazdy skręcające w prawo na najbliższym skrzyżowaniu, jest rozwiązaniem standardowym. Polega na tym, że w wyznaczonej odległości od linii zatrzymań pas zostaje otwarty dla pojazdów z zamiarem skrętu w prawo, dzięki czemu można uniknąć skomplikowania relacji na wlocie skrzyżowania. Potok na wlocie skrzyżowania ma więc charakter mieszany. Od jego długości oraz struktury w dużej mierze zależą warunki przejazdu autobusów przez skrzyżowanie.

W przypadku, gdy pojazdy skręcające w prawo zgłaszają się na sygnale zielonym i są w stanie płynnie opuścić pas autobusowy (sytuacja ruchowa na wylocie skrzyżowania to umożliwia) – w zasadzie blokowanie autobusów ma charakter sporadyczny. Podobnie dzieje się w przypadku, gdy dojdzie do zatrzymania pojazdów na sygnale czerwonym, ale liczba pojazdów znajdujących się na wlocie w kolejce przed autobusem jest na tyle nieduża, że straty czasu ogra-

niczają się w zasadzie do czasu zatrzymania na sygnale czerwonym, a czas rozładowania kolejki trwa kilka sekund.

Taką sytuację przedstawiono na rysunku 1A. Przed autobusem zatrzymały się dwa pojazdy, które po uzyskaniu sygnału zielonego rozpoczęły skręt w prawo i zatrzymały przed przejściem dla pieszych nie powodując dodatkowego zatrzymania autobusu, który także ruszył z kolejki.



Rys. 1. Przejazd autobusu po wydzielonym pasie na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną (opracowanie własne)

Jednak sytuacja zasadniczo się zmienia, gdy na tym samym wlocie skrzyżowania potok pojazdów skręcających w prawo jest większy niż długość odcinka akumulacji przed przejściem dla pieszych. Wówczas każdy następny pojazd w kolejce przed autobusem zablokuje jego przejazd i wymusi dodatkowe zatrzymanie. Strata czasu wynikająca z czasu rozładowania kolejki wydłuży się. Oczywiście, jeśli zatrzymanie będzie krótkotrwałe, wielkość strat czasu będzie możliwa do zaakceptowania. Jeżeli natomiast długość kolejki będzie znacząca, a sytuacja ruchowa na wylocie skrzyżowania (spowodowana kongestią lub częściej ruchem pieszych po przejściu równoległym) uniemożliwi sprawne rozładowanie kolejki – autobus poniesie znaczne straty czasu, w najgorszym przypadku straci możliwość przejazdu na bieżącym sygnale zielonym i straty czasu powiększą się o konieczność oczekiwania na kolejne otwarcie w sygnalizacji. Taką sytuację ilustruje rysunek 1B.

Podobnie dzieje się, gdy na pasie autobusowym znajdują się pojazdy nieuprawnione, przejeżdżające na wprost, przemieszane z pojazdami skręcającymi, które sztucznie kolejkę wydłużają. Ma to miejsce w przypadku, gdy warunki ruchu na pasach ogólnodostępnych są trudne. W przypadku braku systemu monitoringu zniechęcającego do takich zachowań – kierowcy szukają szansy przyspieszenia przejazdu pasem autobusowym.

Aby zapobiec częstemu występowaniu powyższych sytuacji, należy zastanowić się nad długością wspólnego odcinka pasa autobusowego. Jeśli jest on zbyt długi – rośnie prawdopodobieństwo wydłużenia kolejki, w której zatrzyma się autobus. Skrócenie odcinka powoduje, że część pojazdów skręcających znajdzie się w kolejce za autobusem, nie przyczyni się zatem do zwiększenia jego strat czasu. Długość takiego odcinka powinna być wyznaczana indywidualnie z uwzględnieniem wszystkich pasażerów znajdują-

cych się w autobusach i pozostałych pojazdach, a nie detalicznej liczby pojazdów. Powinny być więc rozpatrywane straty czasu przypadające na pasażera, a nie pojazd.

Bardzo dużo zależy od sygnalizacji świetlnej, od długości oraz szczególnie momentu zapalenia się sygnału zielonego w stosunku do momentu zgłoszenia autobusu. Niestety w polskich miastach wydzielenie pasa dla autobusów ciągle jeszcze rzadko wiąże się z zapewnieniem priorytetu w sygnalizacji świetlnej.

Zależność czasu rozładowania kolejki i przejazdu w kolejce na pasie autobusowym od jej długości

Czas tracony przez autobus na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją świetlną składa się z:

- czasu zatrzymania autobusu w kolejce, wynikającego z konieczności oczekiwania na sygnał umożliwiający przejazd skrzyżowania, liczonego od momentu zatrzymania w kolejce do momentu ruszenia po zapaleniu się sygnału umożliwiającego przejazd skrzyżowania; obejmuje on czas oczekiwania na sygnale czerwonym (ta strata dotyczy również zatrzymań na pierwszym miejscu w kolejce) oraz czas od momentu zapalenia się sygnału zielonego do momentu ruszenia autobusu z kolejki, zdefiniowany jako czas rozładowania kolejki;
- czasu przejazdu autobusu w kolejce uformowanej przed autobusem na wlocie skrzyżowania, liczonego od momentu ruszenia z kolejki do momentu przecięcia linii zatrzymań na skrzyżowaniu.

Czas oczekiwania na sygnale czerwonym jest głównie efektem braku zastosowania priorytetu w sygnalizacji na wlocie skrzyżowania, uniemożliwiającym przejazd bez zatrzymania. Z kolei czas rozładowania kolejki oraz czas przejazdu w kolejce zależą głównie od liczby pojazdów (także ich struktury rodzajowej) znajdujących się przed autobusem, a także od sytuacji ruchowej na wylocie, spowodowanej m.in. ruchem pieszych na przejściu równoległym do ciągu z pasem autobusowym. Jeżeli kolejka jest zbyt długa, autobus poniesie znaczące straty czasu.

Podjęto więc próbę opisu wpływu długości kolejki wyrażonej w pojazdach na czas jej rozładowania oraz czas przejazdu w kolejce. W tym celu wykorzystano wyniki własnych wstępnych pomiarów długości kolejek na pasach autobusowych na odpowiednio 3 i 7 wlotach skrzyżowań. Na wszystkich badanych wlotach nie ma zapewnionych priorytetów w sygnalizacji dla autobusów, nie występują znaczące natężenia ruchu pieszego na przejściach równoległych.

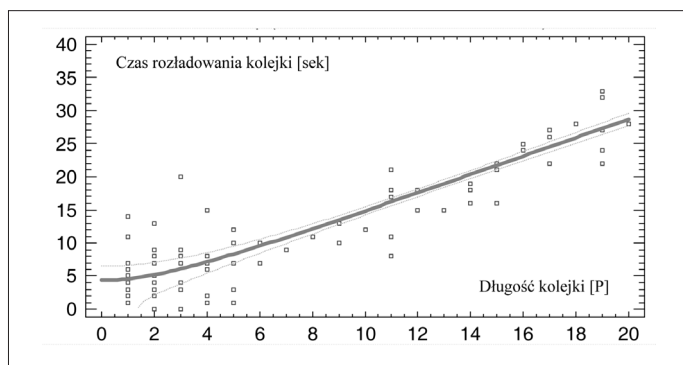
W badaniach wpływu długości kolejki na długość czasu rozładowania kolejki uwzględniono łącznie 415 zatrzymań na wlotach w tym 105 obserwacji kolejek o długości od 1 do 20 pojazdów. W przypadku kolejek „zerowych” ustalono, że pojazd traci średnio 1 sekundę, co odpowiada reakcji kierowcy na pojawienie się sygnału zielonego. W przypadku kolejek „niezerowych” najlepsze dopasowanie do uzyskanych wyników uzyskano w przypadku modelu regresji prostej nieliniowej, o postaci:

$$t_R = \sqrt{18,9 + 2,0 \cdot K^2}$$

gdzie:

t_R – czas rozładowania kolejki na wlocie skrzyżowania [sek],
 K – długość kolejki na wlocie skrzyżowania [P]; $K = \{1; 20\}$.

Graficzne przedstawienie dopasowanego modelu na tle wyników pomiarów zamieszczono na rysunku 2. Na rysunku zaznaczono także przedział ufności (liniami przerywanymi), wyznaczony na podstawie 95-procentowego poziomu ufności. Współczynnik korelacji dla takiego dopasowania wyniósł 0,93, co oznacza bardzo silny związek pomiędzy zmiennymi. Jednak ponieważ do jego budowy wykorzystano dane z tylko trzech wlotów skrzyżowań – nie może być on traktowany jako w pełni reprezentatywny. Można jednak przyjąć, że daje dobry pogląd na analizowane zjawisko. Dlatego będzie stanowił bazę do przyszłych analiz.



Rys. 2. Zależność czasu rozładowania kolejki na pasie autobusowym od jej długości (opracowanie własne)

Z kolei w analizie wpływu długości kolejki na czas przejazdu w kolejce uwzględniono wyniki 1237 zatrzymań autobusów na wlotach skrzyżowań, w tym 263 przypadki występowania kolejek o długości od 1 do 20 pojazdów. W analizie pominięto przypadki, kiedy autobusom nie udało się przejechać skrzyżowania w ciągu jednego cyklu sygnalizacji – przypadki te zostaną objęte osobnymi badaniami. Najlepsze dopasowanie modelu regresji do uzyskanych wyników pomiarów uzyskano w przypadku modelu:

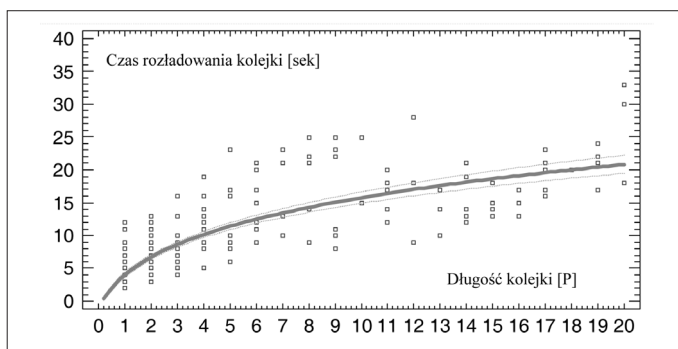
$$t_K = (2 + 0,856 \cdot \ln K)^2$$

gdzie:

t_K – czas przejazdu w kolejce [sek],
 K – długość kolejki na wlocie skrzyżowania [P].

Graficzne przedstawienie dopasowanego modelu na tle wyników pomiarów zamieszczono na rysunku 3.

Mimo uzyskania wysokiej wartości współczynnika korelacji na poziomie 84% (model wyjaśnia 70,3% przypadków), uzyskany model należy traktować poglądowo. Będzie on dalej rozwijany poprzez uwzględnianie wyników pomiarów z kolejnych wlotów oraz z rozwarstwieniem na różne typy skrzyżowań.



Rys. 3. Zależność czasu przejazdu w kolejce od długości kolejki na pasie autobusowym (opracowanie własne)

Należy w tym miejscu nadmienić, że czas rozładowania kolejki oraz czas przejazdu w kolejce są tylko składnikami czasu traconego na skrzyżowaniu. Ich dopełnieniem jest czas spędzany w kolejce (t_c), tracony na sygnale czerwonym. W tabeli 2 zamieszczono orientacyjne wartości sumarycznego czasu traconego przez autobus na przystanku.

Tabela 2

Czas tracony na wlocie skrzyżowania z sygnalizacją	
Długość kolejki przed autobusem na wlocie [P]	Czas rozładowania kolejki i czas przejazdu w kolejce na wlocie skrzyżowania [sek]
3	$t_C + 12$
6	$t_C + 17$
9	$t_C + 21$
12	$t_C + 24$
15	$t_C + 27$
t_C – czas zatrzymania na sygnale czerwonym [sek]	

Po uwzględnieniu liczby pasażerów znajdujących się w autobusie, których straty czasu tak naprawdę dotyczą, można uznać, że czas rozładowania kolejki i czas przejazdu w kolejce są znaczące. Przykładowo, przyjmując długość kolejki równą 6 pojazdów oraz napełnienie autobusu na poziomie 100 osób – straty czasu pasażerów (bez uwzględnienia czasu zatrzymania na sygnale czerwonym) wyniosą 28 minut.

Jest to potwierdzenie, że należy dążyć do skracania kolejek na pasach autobusowych na wlotach skrzyżowań. Skrócenie można uzyskać między innymi poprzez:

- monitoring pasów autobusowych zmierzający do wyeliminowania pojazdów nieuprawnionych do korzystania z tych pasów, chodzi tutaj głównie o funkcję prewencyjną, ale także umożliwienie skutecznego karania kierowców łamiących przepisy ruchu drogowego;
- uruchomienie „zielonej strzałki” na wlocie skrzyżowania, która umożliwi częściowe rozładowanie kolejki jeszcze w trakcie trwania sygnału zielonego;
- wydzielenie pasa ruchu dla pojazdów skręcających w prawo poza pasem autobusowym (jeśli pozwalają na to warunki przestrzenne, fot.1), wówczas wpływ zakłóceń od nadmiernego ruchu pojazdów skręcających w prawo na ruch autobusowy jest w zasadzie eliminowany, jedyny kontakt tych pojazdów z pasem autobusowym polega na przecięciu pasa, jeżeli liczba



Fot.1. Przykład wydzielenia pasa do skrętu w prawo poza pasem autobusowym – Praga (fotografia własna)



Fot.2. Przykład wydzielenia dwóch pasów do skrętu w prawo poza pasem autobusowym - Stuttgart (fotografia własna)

pojazdów skręcających w prawo w okresie szczytowym jest na tyle znaczna, że kolejka pojazdów do skrętu w prawo rozpoczyna się już na pasie ogólnodostępnym, jeszcze przed przejazdem przez pas autobusowy (co wiąże się z ryzykiem jego blokowania) – warto rozważyć wydzielenie nawet dwóch pasów poza pasem autobusowym, dbając jednocześnie o klarowne oznakowanie pasa autobusowego, co przedstawiono na fot. 2;

- skrócenie odcinka, na którym pojazdy skręcające w prawo mogą korzystać z pasa autobusowego, dzięki czemu można regulować długość kolejki przed autobusem na wlocie skrzyżowania – w przypadku wdrożenia takiego rozwiązania pojazdy skręcające w prawo muszą korzystać z pasa ogólnodostępnego aż do momentu otwarcia pasa dla skręcających, co wpłynie na zmniejszenie liczby pojazdów znajdujących się przed autobusem na wlocie skrzyżowania. Jest to rozwiązanie, które można polecać w miejscach o szczególnie dużych stratach czasu, gdzie wzrasta prawdopodobieństwo nie rozładowania kolejki w czasie trwania sygnału zielonego, co skutkuje koniecznością oczekiwania autobusu na kolejne otwarcie w sygnalizacji. Na fot. 3 przedstawiono przykład z Genui, gdzie pas autobusowy bardzo restrykcyjnie oddzielono od pasa ogólnodostępnego za pomocą separatora,



Fot. 3. Przykład krótkiego odcinka, na którym pojazdy skręcające w prawo mogą korzystać z pasa autobusowego – Genua (fotografia własna)

a odcinek wspólny bezpośrednio na wlocie ograniczono do miejsca dla dwóch samochodów osobowych. Aż tak daleko idące rozwiązania można stosować tylko w wyjątkowych sytuacjach, jednak warto zwrócić uwagę na ten przykład bardzo zdecydowanego postawienia na transport zbiorowy.

Podsumowanie

Znajomość mechanizmów powstawania zakłóceń ruchu autobusów może być pomocna przy konstrukcji realistycznych rozkładów jazdy oraz wdrażania w pełni efektywnych środków uprzywilejowania. Straty czasu autobusów na skrzyżowaniach należą do najważniejszych przyczyn zakłóceń na ciągach z pasami autobusowymi. W dużej mierze zależą one od natężeń ruchu ogółu pojazdów na wlotach skrzyżowań (gdzie z pasa autobusowego korzystają także pojazdy skręcające w prawo), czego konsekwencją są niekiedy dalekie miejsca autobusów w kolejkach. Czas rozładowania kolejki oraz przejazdu w kolejce mogą być modelowane funkcją długości kolejki, a zaprezentowane modele dają dobry pogląd na wielkość strat czasu autobusów i pasażerów. Mogą też stanowić ostrzeżenie przed wdrażaniem zbyt długich odcinków pasów, z możliwością wykorzystywania przez ogół pojazdów. Badania te będą nadal kontynuowane.

Literatura

1. Rudnicki A., *Stochastyczny model ruchu miejskiej komunikacji autobusowej*, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 1973.
2. Bauer M., *Wpływ infrastruktury ulic na funkcjonowanie komunikacji autobusowej*, Praca doktorska, Politechnika Krakowska, Kraków 2008.
3. Żochowska R., Karoń G., *Przegląd literatury na temat zjawiska kongestii i zakłóceń ruchu w systemie transportowym miasta w aspekcie modelowania podróży*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, seria: Materiały konferencyjne nr 2(98)/2012, Kraków 2012.
4. Krych A., Tulibacki W., *Badania przyczyn zawodności komunikacji miejskiej w Poznaniu*, Materiały konferencyjne *Badania procesów przewozowych wspomagające zarządzanie transportem zbiorowym w miastach*, Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, nr 46 (92), Kraków 2002.
5. Sambor A., *Priorytety w ruchu dla pojazdów komunikacji miejskiej*, Izba Gospodarcza Komunikacji Miejskiej, Warszawa 1999.