

Krystian Birr, Kazimierz Jamroz, Wojciech Kustra

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Katedra Transportu Szynowego, Katedra Inżynierii Drogowej

ANALIZA CZYNNIKÓW WPLYWAJĄCYCH NA PRĘDKOŚĆ POJAZDÓW TRANSPORTU ZBIOROWEGO NA PRZYKŁADZIE GDAŃSKA

Rękopis dostarczono, kwiecień 2013

Streszczenie: W referacie przedstawiono istotę problemu szacowania prędkości pojazdów transportu zbiorowego w szczególności w zakresie modelowania ruchu. Przedstawiono i omówiono wyniki przeprowadzonych w maju ubiegłego roku pomiarów czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego na obszarze Gdańska w ramach budowy systemu sterowania ruchem TRISTAR. Otrzymane wyniki zestawiono w celu zaprezentowania statystyki oraz zidentyfikowania czynników wpływających na prędkość pojazdów transportu zbiorowego w warunkach miejskich. W oparciu o otrzymane dane statystyczne zbudowano funkcję pozwalającą na ogólne oszacowanie czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego pomiędzy skrzyżowaniami z uwzględnieniem średniego czasu obsługi przystanku.

Słowa kluczowe: transport zbiorowy, modelowanie, prędkość

1. WPROWADZENIE

Prędkość jazdy jest jednym z podstawowych i jednocześnie najważniejszych parametrów opisujących warunki ruchu na sieci transportowej. Parametr ten może być wykorzystywany do oceny jakości podróżowania w danym obszarze. Ponadto wraz z rozwojem inteligentnych systemów transportowych prędkość pojazdów oraz strumieni pojazdów pełni istotną rolę w systemach zaawansowanego zarządzania ruchem. Wartość prędkości, wraz z innymi parametrami, jak natężenie ruchu, są w tym przypadku informacją o bieżącej sytuacji na sieci transportowej. Zagadnienie to dotyczy również transportu zbiorowego, dla którego szacowanie czasu przejazdu, czyli również prędkości jest niezbędne do dynamicznego przekazywania wiarygodnej informacji w systemach informacji pasażerskiej. Dzięki temu potencjalny pasażer jest na bieżąco informowany o czasie przyjazdu interesującego go pojazdu, przez co ma możliwość zaplanowania ewentualnej alternatywnej trasy podróży, bardziej atrakcyjnej pod względem czasu.

Informacja o zmienności czasu przejazdu na poszczególnych odcinkach sieci jest również przydatna operatorom transportu do sterowania dyspozytorskiego.

Problem konieczności szacowania prędkości i czasu przejazdu występuje również w modelowaniu ruchu. Dążąc do jak najdokładniejszego odwzorowania przepływów ruchu, stopnia obciążenia poszczególnych odcinków sieci, a także, rozważając tę kwestię szerzej, zachowań transportowych, należy prawidłowo oszacować średnie prędkości dla każdego z typów i podtypów odcinka i środka transportu. Jakkolwiek w przypadku prędkości pojazdów transportu indywidualnego zagadnienie to jest często rozważane w literaturze, tak w przypadku transportu zbiorowego najczęściej przyjmuje się sztywne czasy przejazdu wynikające z rozkładu jazdy.

Chcąc rozpocząć rozważania na temat sposobów szacowania średniej prędkości pojazdów transportu zbiorowego należy poddać analizie ruch tych pojazdów, czyli czas jazdy, straty czasu z uwzględnieniem czynników je powodujących, a także dodatkowo czas obsługi przystanków. Identyfikacja i analiza tych czynników powinna pozwolić na sformułowanie zależności pomiędzy nimi, a średnią prędkością pojazdu.

W niniejszym artykule przedstawiono statystyczne zestawienie wyników badań czasu przejazdu zrealizowanych na potrzeby wprowadzenia inteligentnego systemu sterowania ruchem TRISTAR na obszarze Gdańska oraz przedstawienie złożoności problemu jego szacowania na potrzeby modelowania ruchu.

2. STAN ZAGADNIENIA

W literaturze poruszającej zagadnienia szacowania czasu przejazdu oraz średniej prędkości pojazdów na poszczególnych odcinkach sieci transportowej przede wszystkim opisuje się sposoby pozyskiwania informacji z sieci drogowej, najlepiej w sposób dynamiczny. Istnieją cztery podstawowe zmienne pozwalające na opis sytuacji na sieci drogowej, szczególnie potrzebne do efektywnego zarządzania ruchem: natężenie N , zajętość odcinka O , prędkość V , długość pojazdu L . Do pozyskania takich informacji niezbędne są pewne narzędzia. Przykładowo do tego celu możliwe jest wykorzystanie najprostszego urządzenia służącego do detekcji pojazdów, tzn. pętli indukcyjnych. Pętle indukcyjne pozwalają na uzyskanie informacji o natężeniu ruchu, które w zestawieniu ze znaną przepustowością drogi, wynikającą z jej parametrów oraz programu sygnalizacji świetlnej, opisują obciążenie danego odcinka sieci drogowej. Wykorzystując grupy pętli indukcyjnych można otrzymać również średnią prędkość przejazdu danego odcinka. Relacje pomiędzy tymi czterema zmiennymi można zapisać następująco [4]:

$$O_i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^{N_i} \frac{L_{ij}}{V_{ij}} \quad (1)$$

gdzie:

- T – czas trwania pomiaru,
- N_i – natężenie ruchu,
- L_{ij} – długość pojazdu,
- V_{ij} – prędkość pojazdu.

Istnieją również inne, bardziej nowoczesne, jak i pozwalające na uzyskanie bardziej szczegółowych danych, metody pomiarów średnich prędkości przejazdu. Do najbardziej popularnych należy pomiar z wykorzystaniem systemu GPS. Efekt jego zastosowania można zaobserwować na kilku internetowych portalach mapowych, które obrazują obecne (odświeżane co na przykład 10 minut) i historyczne prędkości na poszczególnych odcinkach sieci transportowej. Szczegółowy opis wykorzystania tego systemu do szacowania średniego czasu przejazdu został opisany już w kilku publikacjach naukowych – przykładowo [6],[7].

Również dla pojazdów transportu zbiorowego w literaturze porusza się tematykę szacowania czasu przejazdu z wykorzystaniem zaawansowanych systemów informacji pasażerskiej (ATIS) lub automatycznej lokalizacji pojazdów (AVL) opierających się przede wszystkim na technologii GPS.

Szerokość poruszanej tematyki wskazuje, że zagadnienie szacowania prędkości pojazdów zarówno transportu indywidualnego, jak i zbiorowego jest bardzo istotne. Niezaprzeczalny jest również fakt, że wartości te są równie istotne w procesie modelowania podróży, gdzie czas przejazdu jest jednym z podstawowych parametrów wpływających na rozkład przestrzenny podróży, podział zadań przewozowych oraz wybór trasy podróży.

Do oszacowania czasu przejazdu odcinka przez pojazdy transportu indywidualnego wykorzystuje się funkcje oporu odcinka, wykorzystujące takie zmienne jak: natężenie ruchu, przepustowość, prędkość w ruchu swobodnym. Jedną z najprostszych takich funkcji jest funkcja sformułowana przez Overgaarda, będąca kombinacją funkcji Soltmana i Smocka:

$$T = T_0 \cdot \alpha \left(\frac{N}{C_p} \right)^\beta \quad (2)$$

gdzie:

- T - czas przejazdu odcinka o jednostkowej długości,
- T_0 - czas przejazdu odcinka o jednostkowej długości przy przepływie swobodnym,
- N - natężenie ruchu na odcinku,
- C_p - natężenie krytyczne,
- α, β - parametry modelu.

Główną cechą tego typu funkcji jest nieciągłość w punkcie granicy przepustowości, w porównaniu do poprzednio używanych funkcji.

Najczęściej wykorzystywaną obecnie funkcją oporu odcinka jest funkcja BPR, wraz ze wszystkimi swoimi odmianami, tj. BPR2, BPR3:

$$T = T_0 + \left(1 + \alpha \cdot \left(\frac{V}{C_p \cdot c} \right)^\beta \right) + \gamma \cdot V \quad (3)$$

gdzie:

- T - czas przejazdu odcinka o jednostkowej długości,
- T_0 - czas przejazdu odcinka o jednostkowej długości przy przepływie swobodnym,

- N - natężenie ruchu na odcinku,
 C_p - natężenie krytyczne,
 α, β, γ - parametry modelu.

W przypadku szacowania czasu przejazdu i prędkości pojazdów transportu zbiorowego w modelowaniu najczęściej zakłada się stały czas przejazdu wynikający z rozkładu jazdy, lub wyznaczone, również na jego podstawie średnie prędkości czasu przejazdu na poszczególnych typach odcinka, rozróżnionych na przykład ze względu na klasę techniczną drogi [3]. Tymczasem często podważa się stosowanie tego podejścia i zaleca się, podobnie jak w przypadku transportu indywidualnego, wykorzystanie funkcji wyznaczającej czas przejazdu z uwzględnieniem natężenia ruchu oraz innych czynników mogących na niego wpływać. Jest to szczególnie istotne na etapie modelowania układu linii transportu zbiorowego, gdyż w sieciach szczególnie narażonych na niepunktualność modelowanie w oparciu o czasu rozkładowe może negatywnie wpływać na jakość wyników [1].

Krajowa literatura szeroko porusza się tematykę prędkości i czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego, szczególnie tramwajów. Jednak ostatnio również pojawiają się publikacje poświęcone analizie zakłóceń czasu przejazdu autobusów, ukazując złożoność problemu [2]. W publikacji [5] autor przedstawił wyniki badań średnich i maksymalnych prędkości przejazdu tramwajów pomiędzy przystankami w zależności od odległości międzyprzystankowych ze wskazaniem różnic pomiędzy trasą wydzieloną, a niewydzieloną od ruchu kołowego. Ponadto zwraca się uwagę na istotność takich czynników jak motoryka motorniczego, separacja torowiska, zarządzanie czasem przez operatora. Wskazanie na tak szczegółowe i trudno mierzalne czynniki świadczy o złożoności poruszanej tematyki.

3. ZAKRES BADAŃ

W maju 2012 roku Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej przeprowadziła badania prędkości i napełnienia pojazdów transportu zbiorowego w ramach budowy zintegrowanego systemu sterowania ruchem TRISTAR na głównych ciągach sieci transportowej Trójmiasta. Na obszarze Gdańsku badania przeprowadzono na 71 liniach na 284 odcinkach ulic, które zostaną objęte systemem.

Pomiar czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego przeprowadzono metodą obserwacji z wnętrza pojazdów transportu zbiorowego, równoległe z pomiarami napełnień pojazdów.. Obserwator w każdym badanym pojeździe notował numer taborowy pojazdu, numer linii, czas przejazdu między skrzyżowaniami objętymi systemem oraz czas i powód każdego zatrzymania pojazdu.

Badanie przeprowadzono w przedziałach czasowych dla następujących okresów transportowych: szczyt poranny (7:00 – 9:00), okres międzyszczytowy (10:30 – 12:30), szczyt popołudniowy (15:00 – 17:00), okres wieczorny (21:00 – 23:00) w typowym dniu tygodnia, tj. poniedziałek – czwartek.

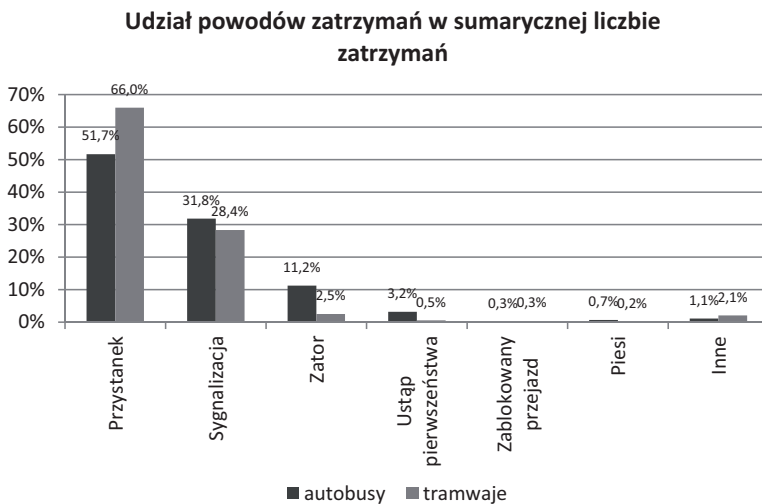
Pomiarami objęto od 25% do 100% kursów na poszczególnych liniach transportu zbiorowego w analizowanych okrasach czasu lub 100% kursów w przypadku, gdy częstotliwość kursowania pojazdów na danej linii jest mniejsza lub równa 60 minut.

4. WYNIKI BADAŃ

4.1. UZYSKANE DANE STATYSTYCZNE

Otrzymane wyniki pomiarów pozwalają na przeprowadzenie badań mających na celu zidentyfikowanie ogólnych czynników wpływających na czas przejazdu oraz znalezienie matematycznych zależności pozwalających na ich dalsze zastosowanie na przykład w dziedzinie modelowania ruchu.

Dążąc do zidentyfikowania udziału ogólnych powodów generowania strat czasu pojazdów transportu zbiorowego w analizowanym obszarze wykonano zestawienie liczby zatrzymań pojazdów z podziałem na przyczyny zatrzymań oraz z rozróżnieniem na środki transportu (rys. 1).



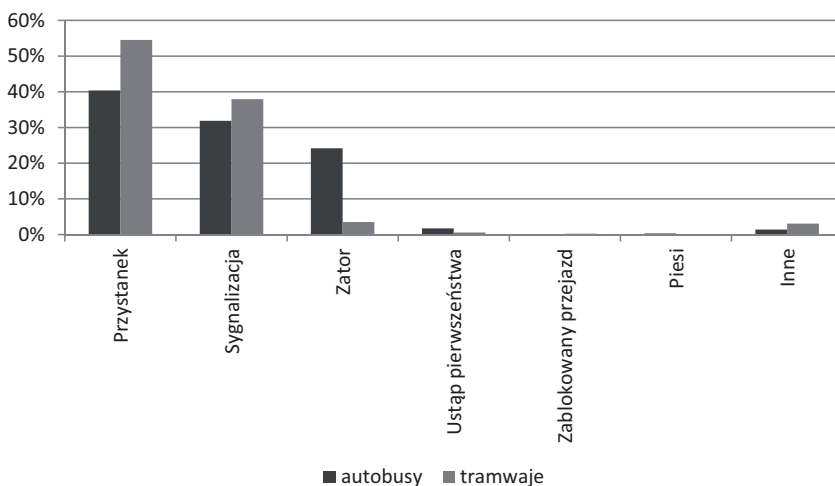
Rys. 1. Udział przyczyn zatrzymań w sumarycznej liczbie zatrzymań

Zarówno w przypadku autobusów, jak i tramwajów największy udział w ogólnej liczbie zatrzymań ma zatrzymanie wymuszone obsługą przystanku. Zestawienie to obrazuje jednocześnie, że w przypadku transportu tramwajowego zakłócenie ruchu występuje rzadziej niż w przypadku autobusów. W przypadku Gdańska uzasadnione jest to faktem, iż

85% torowisk jest wydzielonych od ruchu kołowego. Pomijając obsługę przystanków, największą liczbę zatrzymań odnotowano z powodu sygnalizacji świetlnej. Stopień udziału zatrzymań z tego powodu, szczególnie w przypadku autobusów, może być częściowo związany z analizowanym obszarem, obejmującym główne ciągi transportowe w mieście. W przypadku tramwajów zauważa się zwiększony udział zatrzymań z powodów "innych". Autorzy, na podstawie rozmów z osobami wykonującymi pomiar wnioskuje, iż zdecydowana większość obserwatorów zaznaczała powód tego typu zatrzymań w sytuacji, gdy przejazd był niemożliwy z powodu pojazdów znajdujących się na torze jazdy tramwaju. Należy zatem interpretować ten powód jako "zablokowany przejazd". Jednocześnie warto zwrócić uwagę na względnie duży udział tej przyczyny zatrzymania (7% bez uwzględnienia zatrzymań na przystankach), który nie wynika bezpośrednio z infrastruktury, czy też programu sygnalizacji świetlnej, ale z przyczyn losowych, w tym przypadku zachowań kierujących innymi pojazdami, którzy nie dostosowują się do przepisów ruchu drogowego.

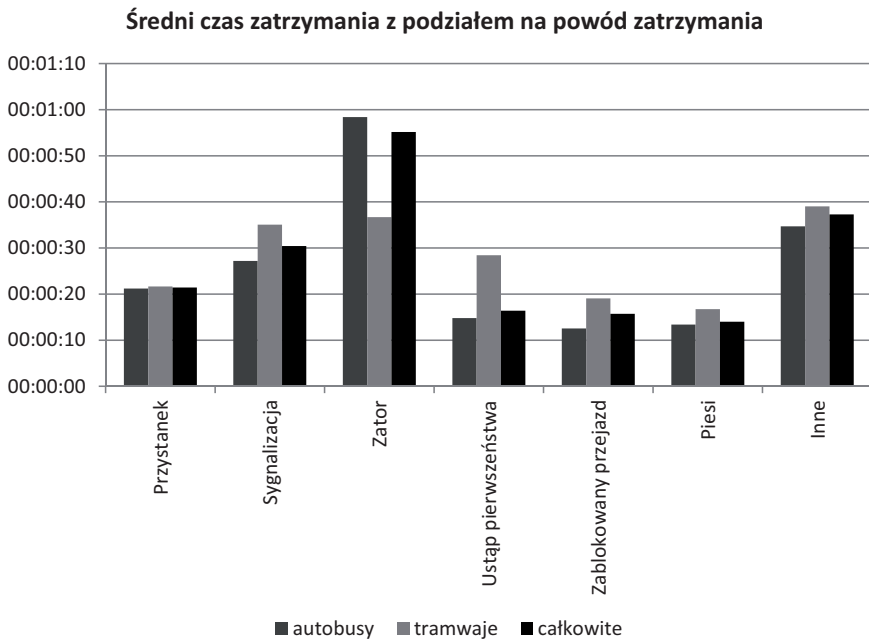
Od liczby zatrzymań znacznie bardziej wartościową statystyką jest udział sumarycznego czasu zatrzymań, również z podziałem na powody zatrzymań i środki transportu (rys. 2). Analizując otrzymane wyniki zauważa się, że udział strat czasu w przypadku autobusów jest większy od czasu obsługi przystanków. Zdecydowanie największe straty czasu są spowodowane sygnalizacją świetlną, która w większości przypadków jest również związana z zatrzymaniami z powodu zatoru. Sytuacja ta dotyczy również transportu tramwajowego, co potwierdza brak istnienia priorytetu dla tego środka transportu. Separacja ruchu tramwajowego od ruchu kołowego przekłada się na niskie straty czasu spowodowane zatorem – sytuacje te odnotowano przede wszystkim w sytuacji, gdy tramwaj poprzedzający uniemożliwia wjazd na przystanek.

Sumaryczny czas zatrzymań z podziałem na powód zatrzymania

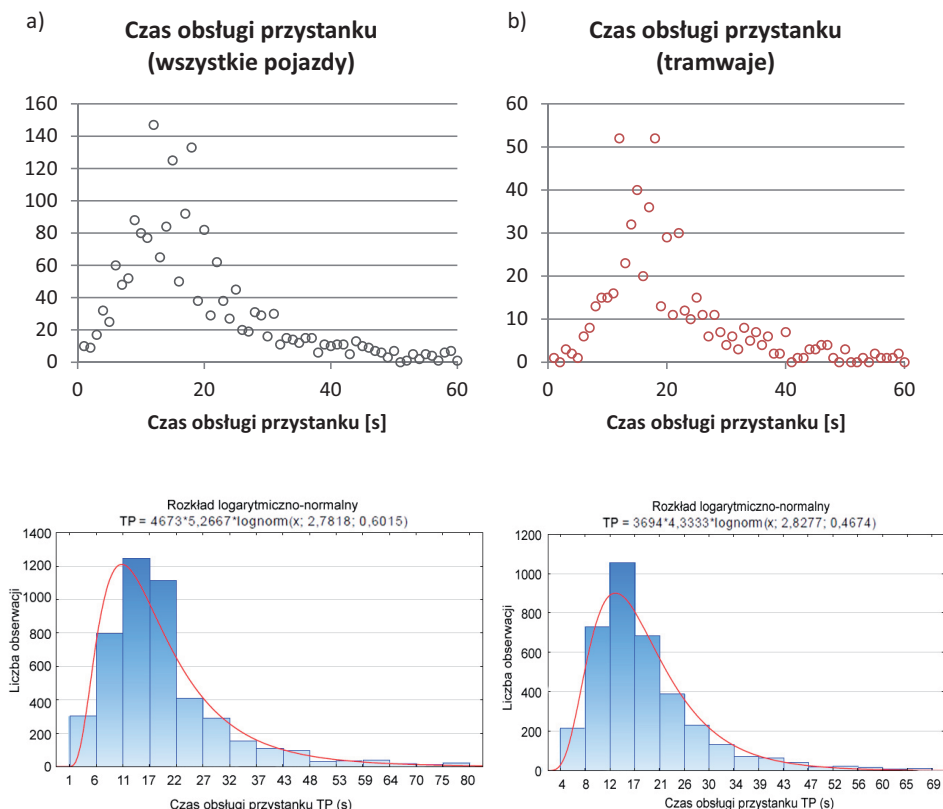


Rys. 2. Sumaryczny czas zatrzymań z podziałem na powód zatrzymania

Kolejną istotną statystyką będącą częścią charakterystyki warunków ruchu pojazdów transportu zbiorowego jest średni czas zatrzymania z podziałem na powody zatrzymania (rys. 3). Największą średnią wartością czasu zatrzymania odnotowano w przypadku zatorów. Z powodu sygnalizacji świetlnej strata czasu dla tramwajów wynosi średnio 35 sekund, zaś dla autobusów 27 sekund. Czas obsługi przystanku został policzony od momentu zatrzymania się pojazdu na przystanku (w Gdańsku pojazdy wyposażone są w tzw. "gorący przycisk", którzy pasażerowie sami naciskają w przypadku chęci wejścia lub wyjścia z pojazdu) do momentu wejścia ostatniego pasażera (z pominięciem osób dobiegających). Średni czas obsługi przystanku w przypadku tramwajów wynosi 20 sekund, zaś w przypadku autobusów 21 sekund. Tak długie czasy mogą być spowodowane faktem, iż obszar, w którym przeprowadzono badania ma w większości przypadków charakter śródmiejski, w którym to zachodzą większe wymiany pasażerów. Na rysunkach 4a, 4b przedstawiono rozkład czasu obsługi przystanków dla wszystkich pojazdów, oraz z wyszczególnieniem przystanków tramwajowych.

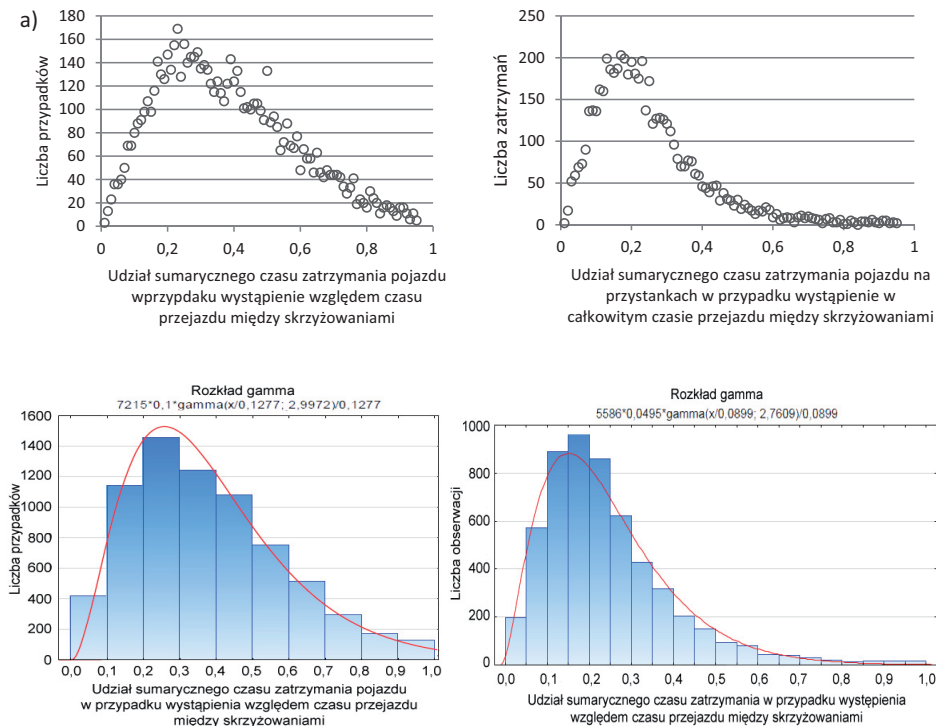


Rys. 3. Średni czas zatrzymania z podziałem na powód zatrzymania



Rys. 4. Rozkład czasu obsługi przystanku (a - wszystkich pojazdów; b - tramwajów)

Celem otrzymania udziału czasu zatrzymań w całkowitym przejeździe danego odcinka dokonano zestawienia sumarycznego czasu zatrzymań na odcinku pomiędzy skrzyżowaniami w przypadku jego wystąpienia z całkowitym czasem przejazdu tego odcinka. Otrzymany średni czas wszystkich zatrzymań na danym odcinku stanowi 35% czasu pokonania tego odcinka (rys. 5a), zaś w przypadku uwzględnienia tylko czasu zatrzymań spowodowanych obsługą przystanku ich udział wynosi 18% (rys. 5b).



Rys. 5. Rozkład udziału sumarycznego czasu zatrzymania pojazdów w przypadku wystąpienia, względem czasu przejazdu między skrzyżowaniami

4.2. SZACOWANIE CZASU PRZEJAZDU

Potwierdzeniem złożoności problemu szacowania prędkości oraz czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego jest próba znalezienia zależności pomiędzy tymi zmiennymi, a przykładowo odległością pomiędzy skrzyżowaniami, średnim czasem obsługi przystanku i liczbą przystanków. Stosując metodę regresji do danych empirycznych dopasowano funkcję matematyczną oraz wyznaczono współczynnik korelacji R^2 dla poszczególnych liczb przystanków. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 6. Wyznaczona funkcja zależności czasu przejazdu od odległości oraz średniego sumarycznego czasu obsługi przystanków charakteryzuje się stopniem zgodności na poziomie $R^2 \approx 0,27$, co jest spowodowane między innymi zróżnicowanym czasem obsługi przystanków i liczby przystanków. Parametry funkcji dopasowano względem wartości średniego sumarycznego czasu obsługi przystanków oraz minimalnego czasu przejazdu występującego w przypadku braku przystanku pomiędzy daną parą skrzyżowań (rys. 6).

Ostatecznie otrzymano następującą zależność wyznaczającą średni czas przejazdu pomiędzy skrzyżowaniami:

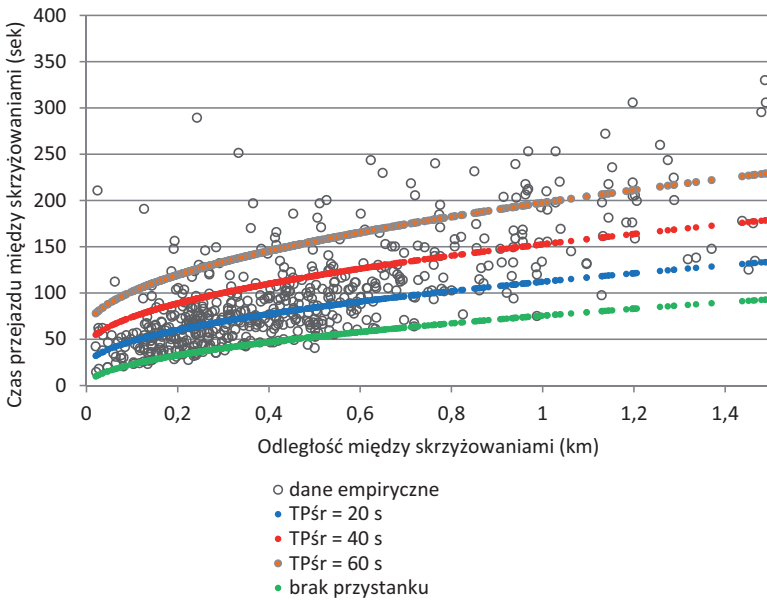
$$T_{\dot{s}r} = 1,6716L^{0,52}e^{3,81 \cdot 0,01TP_{\dot{s}r}} + TP_{\dot{s}r} \quad (4)$$

gdzie:

$T_{\dot{s}r}$ – średni czas przejazdu między skrzyżowaniami (sek.),

L – odległość pomiędzy skrzyżowaniami (km),

$TP_{\dot{s}r}$ – średni sumaryczny czas obsługi przystanków (sek.)



Rys. 6. Szacowanie średniego czasu przejazdu od odległości oraz średniego sumarycznego czasu obsługi przystanków

5. PODSUMOWANIE

Przedstawione w niniejszym referacie dane statystyczne stanowią bazę do podjęcia dalszych prac badawczych ruchu pojazdów transportu zbiorowego. Ponadto stanowią punkt odniesienia dla weryfikacji efektywności budowanego w Trójmieście systemu sterowania ruchem, który w swym zakresie zawiera także wprowadzenie priorytetu dla pojazdów transportu zbiorowego.

Otrzymane wyniki pomiarów ukazują złożoność problemu szacowania prędkości i czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego na potrzeby modelowania ruchu.

Liczba czynników wpływających na te wartości jest duża, a same czynniki są niekiedy trudno mierzalne. Dążąc do uzyskania podobnej zależności, jak w przypadku funkcji oporu odcinka dla transportu indywidualnego, należy przeanalizować zależność prędkości pojazdów transportu zbiorowego od natężenia ruchu, co będzie kolejnym etapem badań autorów. Wydaje się jednak, że chcąc zbudować bardziej szczegółowe modele wyznaczające średnie prędkości przejazdu pojazdów transportu zbiorowego, należałoby szczegółowo scharakteryzować poszczególne odcinki sieci pod względem zarówno infrastruktury (uwzględniające również jej stan) oraz organizacji ruchu, a następnie zagregować do grup odcinków o podobnej charakterystyce i dla nich zbudować funkcję pozwalającą na oszacowanie średniej prędkości przejazdu.

Bibliografia

1. Bauer M.: Wpływ jakości połączenia na wybór linii w podróżach miejskich; Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne nr 98, Kraków 2012.
2. Bauer M.: Zakłócenia czasu przejazdu autobusów korzystających z wydzielonych pasów ruchu na wlotach skrzyżowań; Transport Miejski i Regionalny nr 02/2013.
3. Birr K., Zawisza M., Budziszewski T., Jamroz K.: Wybrane problemy modelowania podróży transportem zbiorowym na przykładzie Gdańska; Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, seria: Materiały Konferencyjne nr 98, Kraków 2012.
4. Dailey D.J.: A statistical algorithm for estimating speed from single loop volume and occupancy measurements, Transportation Research 1998.
5. Krych A.: Modelowanie i symulacja ruchu tramwajów w projektach ITS; Zeszyty Naukowo-Techniczne Oddziału SITK w Krakowie, seria: Materiały konferencyjne nr 90 (Zeszyt 148), Kraków 2009.
6. Li Siyu., Enam A., Abou-Zeid M., Ben-Akiva M.: Travel Time Modeling with Taxi GPS and Household Survey Data, TRB 2013.
7. Sanaullah I., Quddus M., Enoch M.: Estimating link travel time from low frequency GPS data, TRB 2013.

ANALYSIS OF FACTORS AFFECTING PUBLIC TRANSPORT VEHICLE SPEED ON CASE OF GDANSK

Summary: The paper presents the essence of the problem of estimating the speed of public transport vehicles, in particular for traffic modeling. Presented and discussed the results of the measurement of travel time of public transport vehicles in Gdansk for the construction of a traffic control system TRISTAR. The results are presented in order to present traffic statistics and to identify the factors that influence the speed of public transport vehicles in urban conditions. Based on the statistical data obtained were built feature that allows a global estimate travel time of public transport vehicles between intersections, taking into account the average stop time on public transport stops.

Keywords: public transport, ride time estimating, modeling