

Wyznaczanie prędkości średniej pojazdów transportu zbiorowego na podstawie danych z systemu zarządzania ruchem¹

JACEK OSKARBSKI

dr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk; ul. Narutowicza 11/12. Tel. +48 58 347-22-96, e-mail: joskar@pg.gda.pl

KRYSTIAN BIRR

mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk; ul. Narutowicza 11/12. Tel. +48 58 347-22-96, e-mail: krystian.birr@pg.gda.pl

MICHAŁ MISZEWSKI

mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347-22-96, e-mail: michal.miszewski@pg.gda.pl

KAROL ŻARSKI

mgr inż., Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska, Katedra Inżynierii Drogowej, 80-233 Gdańsk, ul. Narutowicza 11/12, tel. +48 58 347-22-96, e-mail: karol.zarski@pg.gda.pl

Streszczenie: Inteligentne Systemy Transportowe (ITS) są wartościowym źródłem informacji o ruchu drogowym, dotyczącym zarówno transportu publicznego, jak i prywatnego. Głównym problemem jest fakt, że niewiele badań jest prowadzonych w celu określenia prędkości autobusów, tramwajów i trolejbusów w miejskich sieciach ulicznych w zależności od warunków ruchu. W pracy skupiono się na tym, jak informacje z systemów ITS mogą być wykorzystane do modelowania prędkości pojazdów transportu zbiorowego. W tym celu wykorzystano dane z wdrożonego w Trójmieście (Gdańsk, Sopot, Gdynia) Zintegrowanego Systemu Zarządzania Ruchem TRISTAR. Głównym celem pracy było opracowanie metody modelowania prędkości pojazdów transportu publicznego, do czego wykorzystano moduły systemu TRISTAR. W artykule wyjaśniono, w jaki sposób można zbierać, analizować i przetwarzać różne dane, a następnie wykorzystać do tworzenia modeli prędkości. Wynikiem analizy jest model prędkości dla pojazdów transportu zbiorowego w Gdyni. Zaproponowaną metodę warto zweryfikować w innych miastach. Wyznaczone prędkości można wykorzystać m.in. do aktualizacji istniejących rozkładów jazdy oraz na potrzeby kalibracji makroskopowego modelu symulacyjnego.

Słowa kluczowe: modelowanie prędkości, transport zbiorowy, Inteligentne Systemy Transportowe

Wprowadzenie

Prędkość jazdy jest jednym z podstawowych i jednocześnie najważniejszych parametrów opisujących warunki ruchu w 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 jest niezbędne do dynamicznego przekazywania wiarygodnej informacji w systemach informacji pasażerskiej. Dzięki temu potencjalny pasażer jest na bieżąco informowany o rzeczywistym czasie przejazdu

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, rozszerzając tę kwestię o zmianę 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. Ze względu na powyższe podjęto próbę zbadania relacji pomiędzy średnią prędkością między przystankami, natężeniem ruchu, przepustowością i ustawieniami sygnalizacji świetlnej.

Problematyka modelowania prędkości

Prędkość jazdy jest kluczowym elementem opisującym ruch pojazdów transportu zbiorowego. Dotychczas nie została wypracowana jednoznaczna metodyka szacowania prędkości ruchu pojazdów transportu zbiorowego, która mogłaby zostać wykorzystana w procesie modelowania ruchu.

Aktualnie modele systemów transportowych dane o prędkości ruchu pojazdów transportu zbiorowego czerpią często z istniejących rozkładów jazdy. Zwiększające się nasycenie sieci drogowych oraz dynamika zmian nasycenia powoduje, że odchylenia od rozkładów jazdy stają się coraz bardziej zauważalne, szczególnie w gęstych miejskich sieciach drogowych. Kierunkiem rozwoju modeli systemów transportu powinno być zatem podejście odwrotne, tj. wykorzystanie rzeczywistych danych o ruchu do kalibracji prędkości pojazdów w sieci odcinków, z uwzględnieniem ich charakterystyki i oddziaływania innych systemów transportu. Modele prędkości na odcinkach pozwalają na określenie

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: J. Oskarbski 25%, K. Birr 25%, M. Miszewski 25%, K. Żarski 25%.

wiarygodnych czasów przejazdu w sieci, co wpływa na możliwość efektywnego tworzenia rozkładów jazdy linii komunikacyjnych, uwzględniając występujące wahania ruchu.

W badaniach usług komunikacji miejskiej można wydzielić różne typy prędkości. Najczęściej spotykanym parametrem jest tzw. prędkość komunikacyjna, tj. stosunek odległości przejazdu do czasu jazdy uwzględniający wszystkie zatrzymania na trasie. Miarą, która nie uwzględnia czasu postojów na przystankach, jest prędkość techniczna. W problematyce modelowania prędkości na odcinkach ma ona większe znaczenie, gdyż jest uzależniona wyłącznie od wpływu lokalnych warunków ruchu i charakterystyki pojazdu. Modele systemów transportu skupiające uwagę na sieciach transportu zbiorowego najczęściej zakładają szacunkowy czas obsługi przystanku, który różni się w zależności od strefy, w której się znajduje, oraz pory dnia [2]. Dokładność modelu rośnie wraz z wykorzystaniem precyzyjnej informacji o czasach obsługi przystanków, jednak należy mieć na uwadze, że ten element podlega największej zmienności i podatności na zdarzenia losowe. Średnia prędkość jazdy pomiędzy przystankami w typowych warunkach ruchu nie odbiega jednak znacząco od charakterystyki prędkości ogólnego potoku ruchu, dla którego prowadzono już badania w zakresie modelowania prędkości.

Dla typowego modelu systemu transportowego składającego się z sieci węzłów i odcinków różnych klas istnieje wyraźna potrzeba implementacji funkcji pozwalających na określenie czasu przejazdu środków transportu zbiorowego. Dotychczas w tym zakresie stosowano głównie stałe wartości odpowiadające typowym średnim prędkościom jazdy. Często widoczny jest brak powiązania zmian profilu prędkości w zależności od aktualnego natężenia ruchu. Gdy pojazdy transportu zbiorowego poruszają się na trasie wspólnie z ruchem indywidualnym, to pomiędzy jednym a drugim systemem transportu występują wzajemne interakcje, wymagające zastosowania matematycznego opisu.

Dotychczas prowadzone badania w zakresie szacowania prędkości jazdy pojazdów transportu zbiorowego często ograniczały się do jednostkowych pomiarów na odcinkach w punktach pomiarowych lub z wykorzystaniem kontroli czasów przejazdu na całej trasie. Dane te rzadko stanowią element pozwalający na zasilanie modeli systemów transportowych aktualnymi danymi, a wykorzystywane są przede wszystkim wewnątrz podmiotów pełniących rolę organizatora transportu publicznego w miastach.

Większość analiz skupia się przede wszystkim na określeniu czasu przejazdu pomiędzy poszczególnymi punktami, mijany jest natomiast aspekt osiągniętej przez pojazd prędkości na danym typie odcinka [3]. Teoretyczne modele sieci ykłe nie rozróżniają również typów odcinków pod kątem klasyfikacji technicznej [4]. Istnieje więc wyraźna potrzeba rozpoznania metody skupiającej się na badaniu prędkości poszczególnych punktach i skonfrontowania jej z typem odcinka oraz występującymi na nim warunkami ruchu.

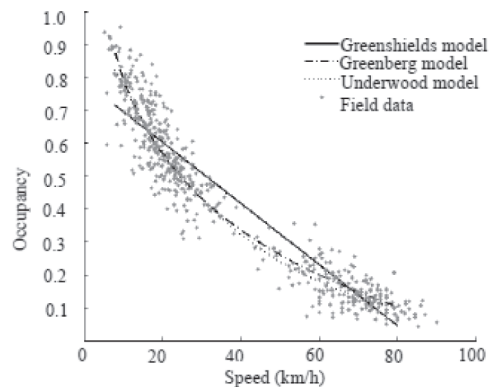
Podstawowym sposobem pomiaru prędkości na odcinku jest pomiar z pojedynczej pętli indukcyjnej. Średnia prędkość pojazdu jest wyznaczana na podstawie danych o natę-

żeniu ruchu oraz zajętości detektora. Systemy sterowania ruchem wykorzystujące pętle indukcyjne mogą być pożytecznym narzędziem służącym do badania prędkości pojazdów [5]. Dostarczają one informacji o natężeniu ruchu $N(t)$, zajętości detektora $O(t)$, prędkości $s(t)$ oraz długości pojazdu $l(t)$. Pomiar pojedynczej pętli umożliwia jednak uzyskanie bezpośredniej informacji tylko o natężeniu i zajętości detektora. Pozostałe dwa składniki szacowane są za pomocą zaimplementowanych w systemach sterowania algorytmów lub z wykorzystaniem stacji pomiarowych składających się z więcej niż jednej pętli indukcyjnej. Dla znanych informacji o charakterystyce ruchu z detektora i , czyli natężeniu N_i oraz zajętością detektora O_i , związek pomiędzy natężeniem, zajętością, prędkością s_{ij} oraz długością j -tego pojazdu l_{ij} przedstawia się następująco:

$$O_i = \frac{1}{T} \sum_{s_{ij}} \frac{N_i l_{ij}}{s_{ij}}$$

gdzie T jest czasem trwania pomiaru. Prędkość pojazdu oraz jego długość należy traktować jako zmienne losowe opisane wartościami średnimi oraz rozkładami statystycznymi. W badaniach z wykorzystaniem pętli stosuje się zarówno metody deterministyczne, jak i stochastyczne [5].

Badania przeprowadzone w Pekinie przez Jin, Wang i Qi [6] wykazały zależność parametrów zgodnie z klasyczną teorią przepływu ruchu. Uzyskano zgodność z deterministycznymi Greenshields model, Greenberg model i Underwood model. Rysunek 1 przedstawia krzywe zależności obłożenia detektora od prędkości dla wykorzystanych modeli w odniesieniu do danych terenowych.



Rys. 1. Stopień zajętości detektora dla różnych modeli
Źródło:[6]

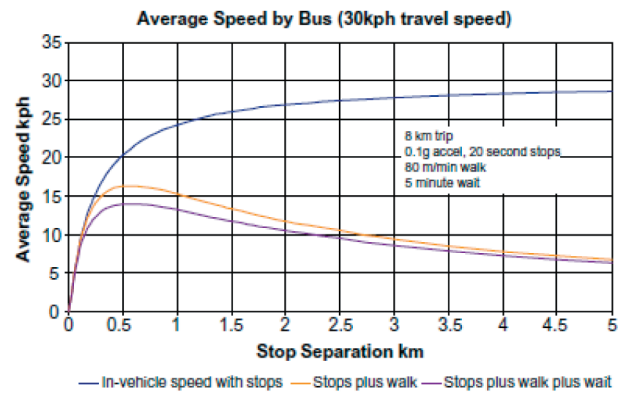
Autorzy wykorzystali następnie bazujący na rachunku prawdopodobieństwa algorytm sieci bayesowskiej (Bayesian network) w środowisku MATLAB do określenia zależności pomiędzy zajętością pętli a prędkością. Stosując różne interwały pomiarowe, uzyskano wysoką zgodność pomiędzy prędkością estymowaną a modelowaną, co pozwala sądzić, że wykorzystanie modelu opartego na prawdopodobieństwie wystąpienia pewnego poziomu zajętości detektora umożliwia oszacowanie prędkości pojazdu w ruchu. Szacowanie prędkości dla pojazdów transportu zbiorowego

wymaga jednak wysokiej dokładności stacji pomiarowych i niezawodności algorytmów klasyfikujących pojazdy według długości. Tylko wtedy możliwe będzie wyznaczanie prędkości autobusów na odcinkach ulic za pomocą pętli indukcyjnych. W przypadku tramwajów problemem może być jedynie pomiar długości składu wpływający na określenie prędkości, w zależności od czasu obłożenia detektora.

Innym podejściem jest analiza zróżnicowania prędkości pomiędzy poszczególnymi systemami transportu. Badanie zróżnicowania czasu podróży z wykorzystaniem różnych środków transportu można uznać za skuteczny sposób oceny stabilności i organizacji transportu, która oddziałuje na zagospodarowanie przestrzenne, gospodarkę i środowisko [7]. Jak wspomniano wcześniej, większość modeli systemów transportu skupia się na określaniu czasu podróży pomiędzy punktami sieci i odnosi się do ogólnego przepływu ruchu. Zdecydowanie dokładniej zbadany został przepływ pojazdów indywidualnych w sieciach drogowych. W tym zakresie istnieje wiele modeli odwzorowujących zachowanie kierowców na odcinkach sieci drogowej. Problem szacowania prędkości pojazdów transportu zbiorowego może być rozwiązany poprzez wykorzystanie modeli zbudowanych dla pojazdów indywidualnych z określeniem istotnych zależności pomiędzy tymi dwoma systemami transportu.

W wielu miastach, gdzie nie występują wydzielone pasy ruchu dla pojazdów transportu zbiorowego, autobusy muszą poruszać się tymi samymi odcinkami dróg co pozostałe pojazdy. W związku z tym doświadczają tych samych utrudnień w ruchu związanych z sygnalizacją świetlną, organizacją ruchu na skrzyżowaniach czy zdarzeniami drogowymi [8]. Określenie stosunku pomiędzy czasem podróży pojazdów indywidualnych a środków transportu zbiorowego na odcinkach o mieszanym ruchu może być uproszczonym, ale jednocześnie użytecznym narzędziem służącym do szacowania prędkości jazdy na tych odcinkach.

Opisywane przez Wardmana [9] badania prowadzone w krajach Europy Zachodniej wskazują na wahania czasu podróży w zależności od wyboru środka transportu oraz motywacji podróży. Zasadniczym elementem jest określenie zróżnicowania składowej czasu podróży określanej jako in-vehicle time (IVT), bowiem niezależnie od wybranego środka transportu pod uwagę należy wziąć również czas dojścia i czas odejścia. Stąd też badania IVT mają największy wpływ na możliwość oszacowania czasu podróży na odcinkach sieci drogowej. Z drugiej strony zdarza się, że czas ędzony w pojeździe stanowi niewielki udział ogólnego czasu podróży, co ma też bardzo istotny wpływ na prędkość jazdy. Problem ten zilustrowany został przez Lowsona [4]. sunek 2 przedstawia wpływ czasu dojścia do przystanku i czasu oczekiwania na średnią prędkość podróży autosem, którego prędkość jazdy w sieci, według przyjętego modelu, wynosi 30 km/h. Istotny jest również fakt, że im więcej przystanki na trasie są rozmieszczone rzadziej, to czas dojścia do przystanku ma największy wpływ na obniżenie prędkości podróży.



Rys. 2. Średnia prędkość autobusu w zależności od odległości międzyprzystankowych
Źródło:[4]

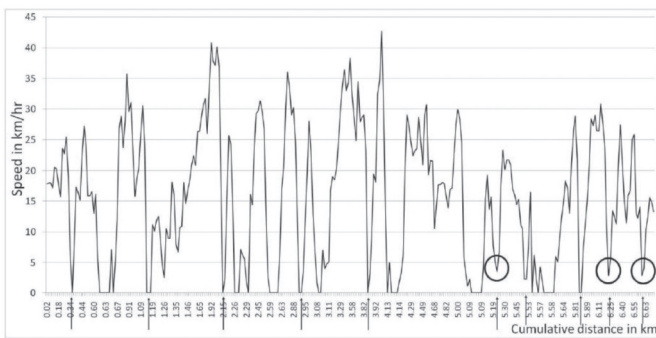
Liczba zmiennych koniecznych do założenia w modelach powoduje, że często uzyskane wyniki mogą znacznie różnić się od rzeczywistych prędkości uzyskiwanych przez pojazdy transportu zbiorowego. W modelach sieciowych szczególnie widoczne jest założenie czasu trwania obsługi przystanków. Czas ten podlega największym wahaniom, a z drugiej strony może mieć bardzo istotny wpływ na średnią prędkość podróży, szczególnie w przypadku podróży na niewielkie odległości. Metoda porównania prędkości dla różnych środków transportu z modeli ruchu obciążona jest więc znaczną niepewnością, stąd istnieje potrzeba skupienia się na bardziej praktycznych metodach badania prędkości pojazdów w ruchu.

Rozwój inteligentnych systemów transportu (ITS) w miastach powoduje znaczne zwiększenie dostępności do informacji na temat ruchu pojazdów w sieciach drogowych. Liczne, gęsto rozmieszczone stacje pomiarowe pozwalają z dużą dokładnością określać natężenie ruchu na odcinkach oraz parametry przejeżdżających pojazdów, takie jak prędkość, długość. Stacje pomiarowe mogą być wykorzystywane do pomiarów prędkości w bardziej wydajny sposób niż pojedyncze detektory pętlowe. Problemem jest jednak, że stacje pomiarowe dostarczają informacji na temat prędkości chwilowej. Dokładny pomiar prędkości na odcinku wymaga skonfrontowania wyników pomiarów w różnych punktach na trasie, a to może być trudne ze względu na ograniczoną gęstość rozmieszczenia stacji pomiarowych na odcinkach ulic oraz w obrębie skrzyżowań.

Ze względu na to, że floty pojazdów transportu zbiorowego są ograniczone do pewnej liczby pojazdów możliwy jest dokładny monitoring ich ruchu w czasie rzeczywistym. Systemy ITS oferują obecnie liczne rozwiązania w zakresie narzędzi dyspozytorskich dla organizatorów transportu zbiorowego. Podstawowym warunkiem funkcjonowania takich systemów jest wyposażenie wszystkich pojazdów w urządzenia pozwalające na ich lokalizację w czasie rzeczywistym. W tym zakresie najczęściej wykorzystywana jest technologia GPS. Informacja o położeniu pojazdów ma również zastosowanie w systemach sterowania ruchem drogowym w celu umożliwienia udzielania priorytetu pojazdom na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Uprzywilejowanie w ruchu ma z kolei wpływ na zwiększenie płyn-

ności jazdy i zwiększenie średniej prędkości na obszarach objętych systemami ITS.

Badania prędkości autobusów w ruchu ulicznym z wykorzystaniem GPS prowadzone były m.in. w Indiach przez Vasantha Kumar i Vanajakshi [8]. W celu pomiaru prędkości jazdy autobusów trasę przejazdu o długości 15 km i 24 przystanków pośrednich podzielono na 500-metrowe sekcje ze względu na wiarygodność uzyskiwanych wyników. Przy ustalaniu długości odcinka pomiarowego należy bowiem wziąć pod uwagę błąd wyznaczenia pozycji GPS oraz lokalne uwarunkowania sieci drogowej, w szczególności odległości między skrzyżowaniami oraz skrzyżowaniami z sygnalizacją świetlną. Fragment wyników przeprowadzonych badań dla przejazdu autobusu przedstawia rysunek 3, gdzie prędkość autobusu jest odniesiona do długości pokonywanej trasy.

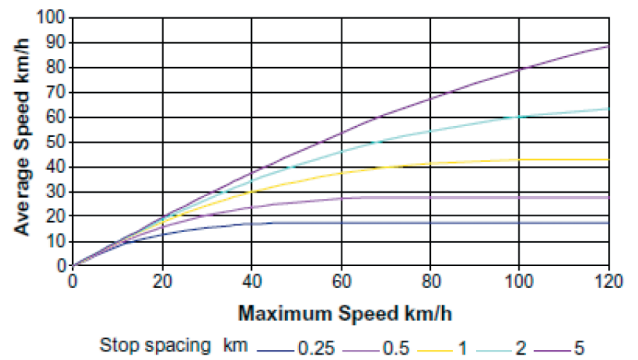


Rys. 3. Wykres prędkość względem przebytego dystansu dla przejazdu autobusu
Źródło:[8]

Na osi poziomej zaznaczono lokalizację przystanków. Jak widać na wykresie, dla przystanków oznaczonych okręgami, prędkość wyznaczona z GPS nie zawsze równała się zero podczas postoju na przystanku. Jest to związane z dokładnością wyznaczenia lokalizacji oraz częstotliwością i ciągłością pomiaru. Podczas krótkiego postoju na przystanku prędkość zmierzona w sąsiednich interwałach pomiarowych jest interpolowana, co tłumaczy uzyskane wyniki.

Wyznaczanie prędkości pojazdów transportu zbiorowego za pomocą pomiarów GPS wydaje się stosunkowo prostym i efektywnym sposobem. Dotychczasowe badania nie skupiały się jednak na określeniu zależności zmian w profilu prędkości jazdy w zależności od występujących warunków ruchu na drodze. Wykorzystanie przepustowości zarówno odcinków, jak i skrzyżowań na trasie przejazdu ma istotny wpływ nie tylko na prędkość chwilową, ale także na obsługę przystanków. Przy znacznym nasyceniu odcinka często utrudnione jest włączenie się pojazdu do ruchu przy wyjeżdżaniu z zatoki przystankowej. W tym przypadku mniejsza, co obrazuje mniejsze przyspieszenie ruszania. W szczegółowej analizie należy podać zatem również lokalizację przystanków i jej wpływ na osiągnięcie wymaganej prędkości jazdy w zależności od natężenia ruchu.

Poza występowaniem przystanków sama gęstość rozmieszczenia przystanków ma bardzo istotny wpływ na cha-



Rys. 4. Zależność średniej i maksymalnej prędkości dla różnych odległości międzyprzystankowych
Źródło:[4]

akter profilu prędkości. Opisane przez Lowsona [4] badania wykazały, że przy średniej odległości międzyprzystankowej na poziomie 500 m żaden środek transportu zbiorowego (drogowy bądź szynowy) nie jest w stanie osiągnąć średniej prędkości komunikacyjnej wyższej od 30 km/h (rys. 4).

Poza gęstością przystanków podobne znaczenie na wahania średniej prędkości ma również gęstość skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. O ile obsługa przystanku zawsze wymaga zatrzymania pojazdu, o tyle przejazd przez skrzyżowanie nie zawsze poprzedzony jest zatrzymaniem na czerwonym świetle. Przy wyznaczaniu prędkości na odcinku należy zatem rozważyć wpływ występowania skrzyżowań oraz przystanków na zmiany profilu prędkości, tzn. czy odcinek odniesienia powinien być definiowany pomiędzy węzłami skrzyżowanie – skrzyżowanie, czy przystanek – przystanek. Z punktu widzenia szerszej dostępności do danych systemu ITS autorzy niniejszej pracy przyjęli pomiary czasu odjazdów z przystanków na badanych trasach linii komunikacyjnych. Określenie zależności pomiędzy charakterystyką odcinka i natężeniem ruchu, a prędkością jazdy wymaga też określenia przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją w interwałach pomiarowych.

Ze względu na niewielką liczbę opracowań skupiających się na wyznaczaniu prędkości jazdy autobusów w sieciach miejskich w odniesieniu do warunków ruchu niniejsza praca skupia się na poszukiwaniu metody określenia tych zależności z wykorzystaniem danych z systemu sterowania ruchem.

Dane źródłowe

Podstawowym źródłem danych do analizy wykonanej w ramach artykułu były bazy danych podsystemów wdrażanego w Trójmieście Zintegrowanego Systemu Zarządzania Ruchem TRISTAR. System jest źródłem bardzo dużej liczby danych o różnym poziomie szczegółowości, które można analizować w różny sposób. Dane, które wykorzystano do analizy pochodzą z trzech tygodni stycznia 2015 roku. Były to, przyjmowane za najbardziej reprezentatywne, 3 dni tygodnia, czyli wtorek środa i czwartek. Wynika z tego, że pozyskano dane z 9 dni pomiarowych w godzinach od 4:00 w nocy do 22:59. Godziny, które zostały wybrane są zależne od godzin kursowania regularnych linii dziennych

na obszarze Gdyni. Na potrzeby artykułu wybrano odcinki między przystankami na 3 głównych ciągach ulicznych będących w obszarze działania systemu TRISTAR w Gdyni. Wszystkie odcinki są drogami klasy G o przekroju 2 pasów w jednym kierunku.

W celu realizacji założeń postawionych przy analizie tematu zdecydowano się na wykorzystanie danych z Systemu Sterowania Ruchem Drogowym (SSRD), Systemu Zarządzania Ruchem Pojazdów Transportu Zbiorowego (SZRT) oraz System Monitorowania i Nadzoru Ruchu Pojazdów (SMNR). Z poszczególnych systemów należało wyodrębnić trzy podstawowe parametry takie jak:

- prędkość przejazdu między przystankami pojazdów transportu zbiorowego,
- przepustowość na wlocie skrzyżowania,
- natężenie ruchu na wlocie skrzyżowania.

Prędkość przejazdu między przystankami była możliwa do obliczenia dzięki SZRT. W ramach tego systemu zainstalowano we wszystkich pojazdach transportu zbiorowego autokopmutery (OBU – On Board Unit), których jednym z zadań jest lokalizowanie pojazdu w sieci drogowej. Na bieżąco pojazdy wysyłają informację o swojej lokalizacji co 20 sekund na odcinkach międzypzystankowych, natomiast z częstotliwością co 10 sekund w obrębie przystanku. Lokalizowanie pojazdu jest również wykorzystywane podczas identyfikacji pojazdu na wlotach skrzyżowań w celu nadania im w miarę potrzeb priorytetu w sygnalizacji świetlnej [10]. Wspomniany OBU rejestruje położenie pojazdu TZ non stop, a tylko informację do centrum wysyła ze wspomnianą częstotliwością. Pomaga to w bardziej dokładnym lokalizowaniu w obrębie przystanków, co pozwala na zarejestrowanie momentu pojawienia się na przystanku i odjazdu z niego. Jest to niezbędne do obliczania czasów przejazdu między przystankami i wykorzystywaniu tego na tablicach informacji pasażerskiej. Znając czas pojawienia się na przystanku i moment odjazdu z niego, w prosty sposób można obliczyć prędkość przejazdu między przystankami przy znanej długości tego odcinka. Po odfiltrowaniu przejazdów, które z różnych przyczyn nie zostały zarejestrowane w bazie danych łączna suma pomiarów na wszystkich 60 odcinkach między przystankowych wyniosła około 13 tysięcy rekordów.

Przepustowość na wlocie skrzyżowania obliczono z wykorzystaniem SSRD, którego podstawowym elementem jest moduł sterowania ruchem pojazdów i pieszych. W ramach tego modułu pracują wszystkie sygnalizacje świetlne włączone do Systemu TRISTAR, co pozwala na rejestrowanie: stanu sygnałów wyświetlanych na wszystkich sygnalizatorach. Na wytypowanych odcinkach znajduje się 37 skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, z czego wynika, że było trzeba przypisać 74 grup sygnałowych – jedna grupa na każdego kierunku na każdym skrzyżowaniu. Informacja o tym, jakie jest wyświetlane światło na sygnalizatorach przypisanych do konkretnej grupy kołowej posłużyła do liczenia przepustowości teoretycznej. W tym celu dopaowano dla wlotów skrzyżowań odpowiadające im grupy sygnałowe. Następnie wyodrębniono dla nich około 400

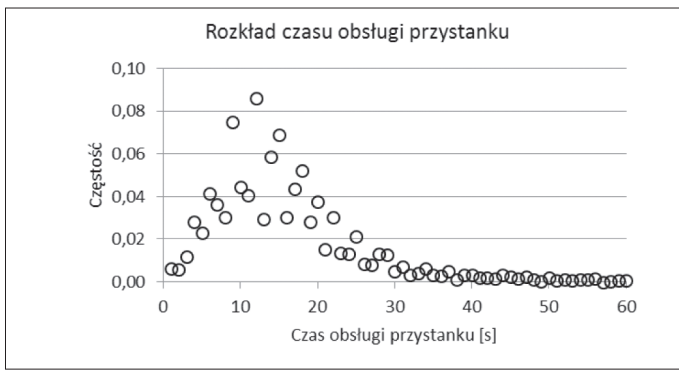
tysięcy pojedynczych wzbudzeń zielonego światła dla grup sygnałowych objętych opracowaniem. Podczas dalszych prac zagregowano czas trwania sygnału zielonego dla poszczególnych grup do godziny. Dzięki temu po uwzględnieniu liczby pasów na wlocie i założeniu, że w czasie ciągłego sygnału zielonego na jednym pasie mogłoby przejechać 1800 poj./h, wyliczono teoretyczną przepustowość. Taki sposób wynika z charakteru pracy programów akomodacyjnych na wszystkich analizowanych skrzyżowaniach. W każdym cyklu pracy skrzyżowania może być wyświetlana różna długość światła zielonego, co wymagało uproszczenia metody obliczeniowej. Z powodu występowania sygnalizacji z fazami na żądanie konieczne było również zweryfikowanie, czy w specyficznych przypadkach światło zielone dla godziny nie trwało dłużej niż godzina (mogło się to zdarzyć w porze nocnej lub wcześniej rano). Dlatego w czasie agregacji uwzględniono tego typu zdarzenia.

Natężenie ruchu na wlocie skrzyżowania zostało policzone z użyciem składowych SMNR. W celu obliczenia liczby pojazdów przejeżdżających przez godzinę przez odcinki pomiarowe wykorzystano umieszczone na każdym wlocie stacje pomiaru ruchu. Dzięki takim stacjom można z bardzo dużą dokładnością dowiedzieć się, jaki był ruch w każdej minucie doby. Pomiarzy ze stacji są przedstawione z uwzględnieniem rodzaju przejeżdżającego pojazdu, jego prędkości chwilowej, odstępu między pojazdami itp. Do obliczeń wykorzystano 134 punkty pomiarowe złożone z pary pętli indukcyjnych oddalonych od siebie o metr i zlokalizowanych na każdym pasie ruchu.

Na samym końcu należało powiązać te wszystkie trzy parametry w jeden zestaw danych do analizy. Dla każdego odcinka między przystankami sprawdzono, jakie występują skrzyżowania i jaka była liczba pasów. Dla każdego skrzyżowania w odpowiednim kierunku przypisano grupę sygnałową i przyporządkowane jej punkty pomiarowe z natężeniami. Na odcinkach, na których występowało więcej niż jedno skrzyżowanie, wybrano to, na którym panowały najgorsze warunki ruchu pod względem stopnia wykorzystania przepustowości w każdej godzinie [11].

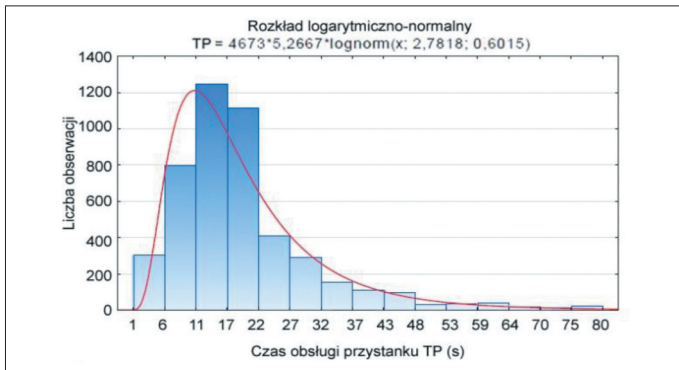
Czas obsługi przystanków

Istotnym elementem w szacowaniu średniej prędkości podróży transportem zbiorowym jest średni czas obsługi przystanków. Czas obsługi przystanku został policzony dla 25% pojazdów od momentu zatrzymania się pojazdu na przystanku (niektóre pojazdy wyposażone są w tzw. gorący przycisk, którzy pasażerowie sami naciskają w przypadku chęci wejścia lub wyjścia z pojazdu celem otwarcia drzwi) do momentu wejścia ostatniego pasażera (z pominięciem osób dobiegających). Uzyskany z badań średni czas obsługi przystanku wynosi 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 5 i 6 przedstawiono rozkład czasu obsługi przystanków dla wszystkich pojazdów. Uzyskany rozkład daje się opisać rozkładem logarytmiczno-normalnym [12].



Rys. 5. Rozkład czasu obsługi przystanku

Źródło: [12]



Rys. 6. Dopasowanie rozkładu czasu obsługi przystanku

Źródło: [12]

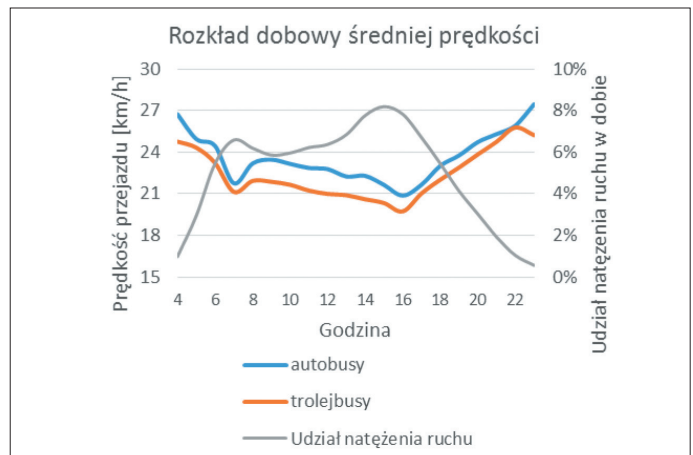
Szacowanie średniej prędkości

Na prędkość przejazdu zarówno pojazdów transportu zbiorowego, jak i indywidualnego, wpływa wiele czynników, których sparametryzowanie nie zawsze jest możliwe. W oparciu o studia literatury, również wymienionej w drugim rozdziale niniejszego artykułu, można zauważyć, że najczęściej wykorzystywanymi do szacowania prędkości czynnikami są: długość odcinka, natężenie ruchu drogowego, stopień wykorzystania przepustowości, klasa techniczna i przekrój.

Na podstawie danych uzyskanych z systemu sterowania ruchem dla odcinków klasy G o przekroju 2/2 (dwie jezdnie z dwoma pasami ruchu każda) dla przedziału godzin 4:00–22:59, uzyskano rozkład zmienności średniej prędkości dla całego tego okresu. Analiza otrzymanego wyniku wykazała, że najwolniej pojazdy poruszają się w godzinach szczytu popołudniowego (15–17), ale także w godzinie szczytu porannego (7–8) zaobserwować można istotną różnicę średniej prędkości. Zestawiając otrzymany rozkład prędkości z rozkładem dobowego natężenia ruchu drogowego, można zauważyć, iż wraz ze wzrostem natężenia ruchu drogowego ulega średnia prędkość przejazdu pojazdów transportu zbiorowego. Zależność ta jest szczególnie zauważalna w wymienionych powyżej godzinach szczytowych.

Dodatkowo dokonano podziału prędkości pomiędzy ch autobusowy i trolejbusowy dla tych samych odcinków, dążąc do wykazania ewentualnych różnic. Otrzymane wyniki (rys. 7) wykazują:

- zmienność średniej prędkości w dobie (do 23%),
- niższą średnią prędkość trolejbusów względem autobusów (o około 5%).



Rys. 7. Rozkład dobowy średniej prędkości przejazdu

Źródło: [11]

Prawdopodobnymi przyczynami niższej prędkości jazdy trolejbusów jest konieczność uwzględnienia sieci jezdnej podczas jazdy ze szczególnym uwzględnieniem zakrętów o małym promieniu, zmniejszonej prędkości przejazdu przez zwrotnice oraz brak możliwości wyprzedzania trolejbusu poprzedzającego.

Potwierdzeniem złożoności problemu szacowania prędkości oraz czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego jest próba znalezienia zależności pomiędzy tymi zmiennymi, a – przykładowo – natężeniem ruchu drogowego Q lub stopniem wykorzystania przepustowości Q/C . Stosując metodę regresji do danych empirycznych, dopasowano funkcję matematyczną oraz wyznaczono współczynnik korelacji R^2 dla prędkości na odcinkach między przystankami względem stopnia wykorzystania przepustowości Q/C . Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunku 8. Wyznaczona funkcja zależności prędkości przejazdu od stopnia wykorzystania przepustowości charakteryzuje się stopniem zgodności na poziomie $R^2=0,49$. Parametry funkcji dopasowano względem wartości empirycznych czasu przejazdu pomiędzy przystankami oraz natężenia ruchu drogowego uzyskanych z systemu sterowania ruchem. Ostatecznie otrzymano następującą zależność wyznaczającą średnią prędkość przejazdu pomiędzy przystankami:

$$V_{av} = 24,89 \cdot 0,27 \left(\frac{Q}{C} \right)^{3,3}$$

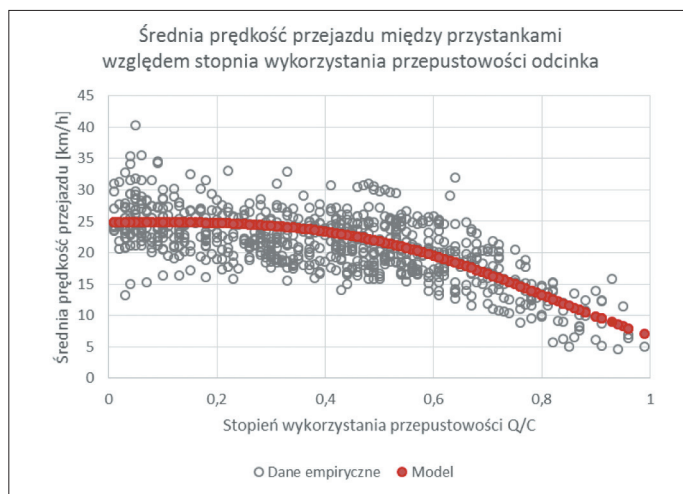
gdzie:

V_{sr} – średnia prędkość przejazdu między przystankami [km/h]

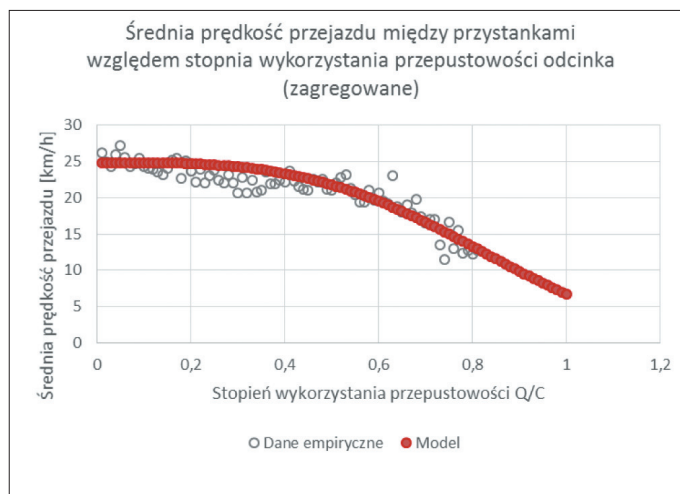
Q – natężenie ruchu drogowego [poj/h]

C – przepustowość odcinka [poj/h].

Dążąc do wyznaczenia średniej prędkości przejazdu z minimalizacją wpływu dodatkowych czynników, głównie losowych, zastosowano narzędzie statystyczne, jakim jest szereg rozdzielczy, i wyznaczono średnią prędkość przejazdu dla każdego ze stopni wykorzystania przepustowości z rozpiętością przedziału wynoszącą 0,01. Na otrzymane wyniki naniesiono wartości modelowe wyznaczone funkcją (2). Stopień dopasowania R^2 wartości modelowych do otrzymanych w ten sposób uśrednionych wartości wynosi 0,84 [11].



Rys. 8. Średnia prędkość przejazdu między przystankami względem stopnia wykorzystania przepustowości odcinka
Źródło: [11]



Rys. 9. Średnia prędkość przejazdu między przystankami względem stopnia wykorzystania przepustowości odcinka (zagregowane)
Źródło: [11]

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza [11] pokazuje, że narzędzia ITS dają duże możliwości w dokonywaniu weryfikacji istniejących modeli ruchu i ich kalibracji do lokalnych warunków. Duża liczba danych zbieranych na bieżąco pozwala również na podejmowanie prób w zakresie opracowywania modeli dotychczas nie zidentyfikowanych lub będących tylko częściowo określonych. Podczas pracy z dużymi bazami danych należy m.in. pamiętać o sprawdzaniu poprawności i dokładności danych. Należy m.in. pamiętać o sprawdzaniu ich poprawności, dokładności oraz odpowiedniego dopasowania do analizowanego problemu. Oczywiście jest, że nie warto budować skomplikowanych baz danych w systemach ITS tylko w celu zbierania danych do analiz na potrzeby modelowania. Ważne jest, żeby budując taki system, zapewnić gromadzenie dodatkowych danych, co nie podnosi kosztów realizacji przedsięwzięcia.

Otrzymane wyniki są obiecujące, ponieważ dały możliwość wyznaczenia prostego modelu prędkości dla całego miasta dla dróg klasy głównej o przekroju 2x2 w zależności od stopnia wykorzystania przepustowości dla Gdyni.

Jednym z dalszych kroków badań powinna być weryfikacja wyników niniejszej analizy na podstawie danych z Gdańska, ze względu na identyczny sposób zbierania danych. Wypracowana metoda obliczania prędkości może również znaleźć zastosowanie w przypadku opracowywania modelu makroskopowego z wykorzystaniem danych o warunkach ruchu na każdym z odcinków. Ponadto prędkości na odcinkach mogą być przydatne przy aktualizowaniu rozkładów dy konkretnego środka transportu.

Kolejnym krokiem w trakcie badań powinno być zebranie przejazdów pojazdów transportu zbiorowego odcinkach międzyprzystankowych z odcinkami między skrzyżowaniami. Tego typu analiza mogłaby przyczynić się do znalezienia zależności między prędkością jazdów indywidualnych a pojazdów transportu zbiorowego na tych samych odcinkach, z uwzględnieniem warunków ruchu.

Literatura

1. Wyszomirski O., *Zarządzanie komunikacją miejską*, Wydawnictwo Uczelniane Wyższej Szkoły Morskiej, Gdynia 1999.
2. Yetiskul E., Senbil M., *Public bustransit travel-time variability in Ankara (Turkey)*, *Transport Policy*, 2012, vol. 23, 2012.
3. Guessousa Y., Aronb M., Bhourib N., Cohenb S., *Estimating travel time distribution under different traffic conditions*, *Transportation Research Procedia*, 2014, vol. 3.
4. Lawson M., *Idealised models for public transport systems*, *International Journal of Transport Management*, 2004, vol. 2.
5. Dailey D.J., *A statistical algorithm for estimating speed from single loop volume and occupancy measurements*, *Transportation Research Part B*, 1999, vol. 33.
6. Jin S., Wang D., Qi H., *Bayesian network method of speed estimation from single-loop outputs* *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 2010, vol. 10.
7. Salonen M., Toivonen T., *Modelling travel time in urban networks: comparable measures for private car and public transport*, *Journal of Transport Geography*, 2013, vol. 31.
8. Vasantha Kumar S., Vanajakshi L., *Mode-wise travel time estimation on urban arterials using transit buses as probes*, *Intelligent Vehicles Symposium (IV)*, 2011, IEEE.
9. Wardman M., *Public transport values of time*, *Transport Policy*, 2004, vol. 11.
10. Birr K., Oskarbski J., Żarski K., *Module of priorities for public transport vehicles in the TRISTAR system*, *Logistyka*, 2014, vol. 4.
11. Oskarbski J., Birr K., Miszewski M., Żarski K., *Estimating the average speed of public transport vehicles based on traffic control system data. International Conference on Models and Technologies for Intelligent Transportation Systems, MT-ITS 2015*.
12. Birr K., Jamroz K., Kustra W., *Travel Time of Public Transport Vehicles Estimation*, *Transportation Research Procedia*, vol. 3, 2014.