Transport Miejski i Regionalny (skrót TMiR)
Czasopismo wydawane od 2004 roku jako kontynuacja tytułu „Transport Miejski", wydawanego od 1982 r.

Redaktor naczelny
Prof. PK dr hab. inż. Wiesław Starowicz (Politechnika Krakowska)
starowicz@sitk.org.pl

Sekretarz redakcji
Mgr Janina Mrowińska (Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji RP, Oddział w Krakowie)
mrowinska@sitk.org.pl

Rada naukowo-programowa
Prof. dr hab.Wojciech Bąkowski (Uniwersytet Szczeciński), mgr inż. Alina Giedryś (niezależny konsultant), prof. dr hab. inż. Andrzej Rudnicki (Politechnika Krakowska), prof. dr inż. Wojciech Suchorzewski (Politechnika Warszawska), prof. dr hab. inż. Antoni Szydło (Politechnika Wrocławska), prof. dr hab., inż. Marian Tracz (Politechnika Krakowska), prof. dr hab. Olgierd Wyszomirski (Uniwersytet Gdański), mgr inż. Barbara Żmidzińska (niezależny konsultant)

Redaktorzy tematyczni
Prof. UTH dr hab. Tadeusz Dyr (Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny w Radomiu – zarządzanie transportem), prof. dr hab. inż. Stanisław Gaca (Politechnika Krakowska – inżynieria ruchu), dr inż. Ryszard Janecki (Politechnika Śląska – transport regionalny), mgr inż. Mariusz Szałkowski (Miejskie Przedsiębiorstwo Komunikacyjne SA w Krakowie – transport miejski), prof. UE dr hab. Robert Tomanek (Uniwersytet Ekonomiczny w Katowicach – ekonomika transportu)

Redaktor statystyczny
Dr inż. Jolanta Żurowska (Politechnika Krakowska)

Redaktor językowy i streszczenia w języku angielskim
Mgr Agata Mierzyńska (Urząd Miasta Krakowa)

Projekt graficzny okładki
Mgr inż. arch. Lucyna Starowicz

Adres redakcji
ul. Siostrzana 11, 30-804 Kraków
tel./fax 12 658 93 74
e-mail: tmir@sitk.org
strona w Internecie: http://tmir.sitk.org

Wydawca
Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej
ul. Czackiego 3/5, 00-043 Warszawa
www.sitk.org

Nakład
800 egzemplarzy

Skład
Tomasz Wojtanowicz

Druk
Wydawnictwo PiT Kraków
ul. Ułanów 54/51, 31-455 Kraków, tel.: 12 290-32-10

Deklaracja o wersji pierwotnej czasopisma
Główną wersją czasopisma jest wersja papierowa
Artykuły w wersji elektronicznej są dostępne na stronie czasopisma z rocznym opóźnieniem

Bazy indeksujące artykuły TMiR
Baza BAZTECH – http://baztech.icm.edu.pl/
Baza Index Copernicus – http://indexcopernicus.com/

Prawa autorskie
Copyright © Transport Miejski i Regionalny, 2016

Informacje dodatkowe
Za wydrukowanie artykułu Redakcja pobiera opłatę 500 zł.
O ulgę w opłacie mogą się starać członkowie SITK oraz wieloletni współpracownicy.
Za treść i formę ogłoszeń oraz reklam Redakcja nie odpowiada.

Spis treści

Jacek Oskarbski, Marcin Zawisza, Michał Miszewski, Karol Żarski, Kazimierz Jamroz **4**
System Informacji dla Kierowców w zarządzaniu ruchem w Trójmieście
Traveler Information System in the Tricity traffic management

Jacek Oskarbski, Krystian Birr, Michał Miszewski, Karol Żarski **10**
Wyznaczanie prędkości średniej pojazdów transportu zbiorowego na podstawie danych z systemu zarządzania ruchem
Determining the average speed of public transport vehicles based on data from traffic management system

Piotr Kisielewski **17**
Nowoczesna platforma projektowa i integracyjna systemów IT w transporcie zbiorowym
Modern design and integration platform of IT systems in urban public transport

Mariusz Kieć, Sylwia Pogodzińska **23**
Ocena stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego na drogach wchodzących w skład ISSRRP
Assessment of road safety on the ISSRRP roads

Mirosław Czerliński, Rafał Ruść, Józef Suda **29**
Ocena efektywności działania priorytetów dla tramwajów realizowanych w systemie SPRINT/ITS/SCATS za pomocą narzędzia VISSIM
Evaluation of trams priorities efficiency in VISSIM simulation of SPRINT/ITS/SCATS system

Piotr Dera, Michał Wojtaszek **34**
Rozbudowa Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego w ramach projektu Rozwój Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie
Tram Traffic Supervision System extension within the project: Development of Public Transport Management System in Cracow

Paweł Gora **40**
Optymalizacja ruchu drogowego bazująca na symulacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych i obliczeń o wysokiej wydajności
Simulation-based Traffic Optimization with Application of Genetic Algorithms and High-Performance Computing

Jan Aleksandrowicz, Maciej Piwowarczyk **46**
Architektura informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy
Architecture of information on the priority for the public transport vehicle drivers

Jan Aleksandrowicz, Maciej Piwowarczyk **49**
Sposoby detekcji pojazdów transportu zbiorowego i ich funkcjonalność
Methods for detection of the public transport vehicles and their functionality

Punktacja artykułów
Każda publikacja w czasopiśmie „Transport Miejski i Regionalny" zgodnie z aktualnym wykazem czasopism punktowanych opublikowanym przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w dniu 23 grudnia 2015 roku (część B) posiada **7 punktów** (dotyczy to również wszystkich publikacji w roku 2015).

Prenumerata TMiR w 2016 roku
Cena egzemplarza – **21 zł** (zagraniczna – **10 euro** z kosztami przesyłki)
Koszt prenumeraty półrocznej – **126 zł** (zagraniczna – **60 euro** z kosztami przesyłki)
Koszt prenumeraty rocznej – **252 zł** (zagraniczna – **120 euro** z kosztami przesyłki)
Studenci – 50% zniżki (na podstawie kserokopii aktualnej legitymacji studenckiej)
Zamówienia: Stowarzyszenie Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie
sklep internetowy: *http://www.sitk.org.pl/sklep* (prenumerata oraz sprzedaż numerów archiwalnych)
Płatność: konto: 43 1240 4722 1111 0000 4859 0666

Streszczenia angielskie – Abstracts in English

Jacek Oskarbski, Marcin Zawisza, Michał Miszewski, Karol Żarski, Kazimierz Jamroz

Traveler Information System in the Tricity traffic management

Abstract: Dynamic information for drivers is one of the key elements of modern traffic management systems. Systems providing current traffic information for the drivers have been used for a long time in a wide scale in Europe on motorways and urban roads. The infrastructure that allows to present traffic related information with dedicated electronic boards (i.a. traffic congestions, updated journey times on the road network) is being developed also in Poland. Such information allows drivers to choose optimal routes which contribute with minimization of inconveniences and cost of the journey. Variable Message Signs also allow to manage dynamically with the traffic speed with reference to the information about weather conditions, temporary impediments (i.a. road works), traffic incidents. This actions influence the level of traffic safety of road users and the level of transport system reliability. The article presents Advanced Traveler Information Systems implemented in Poland. The foundations of ATIS in TRISTAR and the infrastructure applied in this system is described. Also connection of different TRISTAR components which supply ATIS with various data is presented together with the vision of its development.

Keywords: dynamic information for drivers, variable message signs, traffic management, Intelligent Transport Systems

Jacek Oskarbski, Krystian Birr , Michał Miszewski, Karol Żarski

Determining the average speed of public transport vehicles based on data from traffic management system

Abstract: Intelligent Transport Systems are a valuable source of traffic information, covering both private cars and public transport vehicles. The main problem, however, is that very few studies are conducted to determine the speed of buses, trams and trolleys in urban networks in relation to traffic conditions. The article investigates how ITS systems data could be used to model the speed of public transport vehicles. This is now possible thanks to the implementation of TRISTAR, an Integrated Traffic Management System covering the Tri – City (Gdansk, Sopot, Gdynia). The objective of the analysis is to develop a method for modelling public transport vehicle speed which is completed with the data from the TRISTAR subsystems. The paper explains how various data can be collected, used and combined to develop speed models. The results of analyses and a proposed speed model for Gdynia's public transport vehicles are presented. This is to be further verified by applying the proposed method in other cities. The speed model can also be used for updating existing public transport timetables. It is also possible to use the speeds for calibrating macroscopic simulation models.

Keywords: speed modelling, public transport, Intelligent Transport Systems

Piotr Kisielewski

Modern design and integration platform of IT systems in urban public transport

Abstract: Time table is the basis for the logistics and the fundamental IT system in an urban public transport. Nowadays the software for time table design are the advanced technology IT systems which offer possibilities of detail transit network design, automatic generation of vehicle trips, vehicle and driver tasks, simulation of vehicle traffic in the network and analysis of operational cost of transport system. Actually time table systems provide necessary data to other urban systems as passenger information systems, ticketing, traffic monitoring and control, ITS and others. In the article an important functionalities of modern timetabling system, forming simultaneously integration platform of IT systems in city public transit have been presented.

Keywords: public transport, network design, time table planning and optimization, IT system, integration platform

Mariusz Kieć, Sylwia Pogodzińska

Assessment of road safety on the ISSRRP roads

Abstract: The article presents an assessment of road safety for the roads included in the dynamic route guidance system called the Intelligent Traffic Control System in Tatra Region (ISSRRP). Evaluation of road safety was carried out based on the odds ratio method. Accidents data from years 2009-2014 have been used for estimating changes in road safety, separately for regional and national roads, as part of traffic control system, and for the whole system. The changes of type and circumstances of accidents are also presented in the article. Number of accidents, people injured and fatalities, and accident rates (e.g. accident density, relative rate of accident and hazard ratio) have been selected as road safety measures. Negative effects on road safety in the period after the ISSRRP implementation has been shown. It was mainly on national roads, included in the system, in relation to the reference group, which is consisted of selected national roads in Małopolska region.

Keywords: road safety, ISSRRP, traffic control, odds ratio, ITS, accident

Mirosław Czerliński, Rafał Ruść, Józef Suda

Evaluation of trams priorities efficiency in VISSIM simulation of SPRINT/ITS/SCATS system

Abstract: The article discusses the assessment of the effectiveness of trams priorities implemented in traffic management system SPRINT/ITS/SCATS being completed in Bydgoszcz. For the purpose of analyses the model of four junctions on the Fordońska street was implemented. The introduction describes the exact location of analysed road system and the purpose of considerations. Also the scope of the study and performance indicator have been defined. The main part of article presents detailed description of each intersection located on the test section of the road. Moreover it describes control method in traffic management system SCATS as well as a way of individual and collective transport vehicle detection. In addition the methods of realization of tram priority were described. Four models of traffic control have also been defined. After the implementation of the road system and control methods to the model, the PTV Vissim simulation was carried out. On such basis, the indicators of effectiveness of the implemented solution have been achieved. In summary, the analysis of the achieved results during simulation was made. Additionally, the analysis of each of the proposed solutions priority has been conducted.

Keywords: priority for urban transport, SPRINT/ITS/SCATS, Vissim, road system model, modelling, real time system

Piotr Dera, Michał Wojtaszek

Tram Traffic Supervision System extension within the project: Development of Public Transport Management System in Cracow

Abstract: The article is to describe development of the Tram Traffic Supervision System within the project: Development of Public Transport Management System implemented by the Municipal Infrastructure and Transport Company in Cracow in 2013 – 2015. Firstly authors presented goals and history of the development of the tram traffic control system which has been implementing in Cracow since 2005. Then specific elements of the system and its functionality are described. Further assumptions of the project of development of tram traffic control system and the most significant new components are presented. At the end: visions of future plans related to the development of the TTSS System to be implemented also with possible support from the European Union funds have been presented in the article.

Keywords: passenger transport, public transport management, tram traffic supervision

Paweł Gora

Simulation-based Traffic Optimization with Application of Genetic Algorithms and High-Performance Computing

Abstract: The article presents an idea for a traffic management system working efficiently in a scale of a large city (e.g., of the size of Warsaw or larger) based on microscopic traffic simulation, metaheuristics (e.g., genetic algorithms), high-performance computing and artificial neural networks. Theoretical deliberations suggest that such system may outperform existing traffic management systems, while initial experiments are encouraging and show that some research efforts should be put to investigate this possibility further.

Keywords: road traffic, genetic alghoritms, optimization

Jan Aleksandrowicz, Maciej Piwowarczyk

Architecture of information on the priority for the public transport vehicle drivers

Abstract: This article presents system architecture for providing information that may help public transport vehicle driver in decision making process, based on the European ITS Framework Architecture. In process of creating functional viewpoint it was proved that functions, user needs and data flows existing within the FRAME Architecture have not been sufficient for planned system and it was concluded that appropriate elements have to be created. Functional, physical and organizational viewpoints for this system have been designed and presented in this paper.

Keywords: public transport priority, driver information, human-machine interface

Jan Aleksandrowicz, Maciej Piwowarczyk

Methods for detection of the public transport vehicles and their functionality

Abstract: The article discusses issues on the detection of the public transport vehicles is the area of intersections with traffic lights. The methods of detection of the public transport vehicles, their functionalities and usefulness in the modern traffic control systems. Measures like: inductive detection, radio detection, video-detection and detection based on the GPS location have been presented in the article. Additionally possibility of application of the RDIF technique for the detection of the public transport vehicles has been proposed.

Keywords: public transport, traffic priority, detection of vehicles

zsk.pk.edu.pl

modelling
kraków 16-17.06.2016
modelowanie podróży
i prognozowanie ruchu

V Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna

„MODELOWANIE PODRÓŻY I PROGNOZOWANIE RUCHU"

Kraków 16–17.06.2016

CELE KONFERENCJI

Celem Konferencji jest prezentacja i wymiana doświadczeń w zakresie modelowania podróży osób i ładunków dla celów prognozowania ruchu, dotyczącego:

- obszarów miejskich,
- obszarów zamiejskich,
- transportu drogowego (w tym zbiorowego i niezmotoryzowanego),
- transportu szynowego,
- transportu lotniczego,
- korytarzy multimodalnych.

W szczególności będą podjęte zagadnienia:

- wykorzystanie prognoz ruchu w studiach wykonalności, analizach efektywności ekonomicznej oraz oddziaływania na środowisko inwestycji transportowych,
- tworzenie baz danych dla potrzeb modelowania ruchu,
- rola metod wskaźnikowych w prognozowaniu ruchu,
- wykorzystanie alternatywnych technik w monitorowaniu podróży,
- zastosowanie narzędzi symulacyjnych w procesie modelowania podróży.

KONTAKT I INFORMACJE

Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Drogowej i Kolejowej
Zakład Systemów Komunikacyjnych, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
Osoba do kontaktu: Aleksandra Faron
tel.: 12 628 23 26 lub 600 892 202
Aktualne informacje o konferencji będą zamieszczane na stronie internetowej:www.zsk.pk.edu.pl
Dodatkowe informacje można uzyskać pod adresem: afaron@pk.edu.pl

System Informacji dla Kierowców w zarządzaniu ruchem w Trójmieście[1]

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
MARCIN ZAWISZA
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: marcin.zawisza@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
KAZIMIERZ JAMROZ
dr hab. inż., prof. PG, 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: kjamroz@pg.gda.pl

Streszczenie: Dynamiczna informacja dla kierowców stanowi jeden z kluczowych elementów współczesnych systemów zarządzania ruchem. Systemy zapewniające przekazywanie kierowcom aktualnych danych o ruchu od dłuższego czasu są stosowane w krajach europejskich zarówno na drogach szybkiego ruchu, jak i w miastach. W Polsce rozwijane są systemy, które za pośrednictwem znaków i tablic elektronicznych prezentują dane m.in. o utrudnieniach w ruchu czy aktualnych czasach przejazdu w sieci drogowej. Tego typu informacje wspomagają wybór optymalnej trasy, co umożliwia minimalizację uciążliwości oraz kosztów podróży. Znaki zmiennej treści pozwalają ponadto w sposób dynamiczny zarządzać dopuszczalnym limitem prędkości, np. na podstawie informacji o zmianach warunków atmosferycznych, robotach drogowych czy zdarzeniach na drodze. Przedstawione funkcjonalności wpływają na zwiększenie poziomu bezpieczeństwa ruchu i niezawodności systemu transportu. Artykuł prezentuje przegląd rozwiązań Systemów Informacji dla Kierowców (SIK) w Polsce oraz założenia modułu informacji dla kierowców w Zintegrowanym Systemie Zarządzania Ruchem TRISTAR. Przedstawiono również powiązania modułu informacji z innymi komponentami systemu TRISTAR zapewniającymi dostęp do aktualnych danych o ruchu oraz plany rozwoju systemu.
Słowa kluczowe: dynamiczna informacja dla kierowców, znaki zmiennej treści, zarządzanie ruchem, Inteligentne Systemy Transportu

Wprowadzenie

W związku z dynamicznym wzrostem motoryzacji oraz mobilności mieszkańców polskich miast obserwuje się coraz więcej problemów związanych z zapewnieniem właściwej obsługi transportowej. Sieci drogowe stają się coraz bardziej zatłoczone, co generuje straty czasu i zmniejsza poziom niezawodności sieci transportowych. Jak wykazały doświadczenia wielu miast amerykańskich i europejskich, rozbudowa układu drogowego rzadko przynosi długofalową poprawę warunków ruchu. W obecnych czasach kluczowe staje się wdrażanie rozwiązań z zakresu Inteligentnych Systemów Transportu (ITS), wśród których szczególne miejsce zajmują Systemy Informacji dla Kierowców (SIK).

SIK jest silnie powiązany z różnymi czynnikami warunkującymi poruszanie się w sieci drogowej, które mogą być sklasyfikowane według czterech różnych kategorii [1]:

- charakterystyka kierowcy, wiek, płeć, znajomość obszaru, po którym się porusza;
- charakterystyki znaków zmiennej treści, w tym m.in. sposób prezentacji i treść komunikatu na znaku oraz jego lokalizacja;
- charakterystyka podróży, m.in. cel podróży oraz czas jej rozpoczęcia;
- zachowanie oraz percepcja kierowcy, m.in. skłonność do podejmowania ryzyka, chęć do korzystania z komunikatów na Tablicach Zmiennej Treści i Znakach Zmiennej Treści (TZT, ZZT).

W literaturze można znaleźć wiele różnych badań nad wpływem informacji o ruchu drogowym na zachowania kierowców. Przykładowe badanie reakcji podróżnych na informacje o ruchu zostało przeprowadzone w obszarze Zatoki Kalifornijskiej [2]. Badanie to polegało na przeprowadzeniu ankiet z kierowcami. Wyniki badań wykazały, że decyzja kierowcy odnośnie wyboru trasy podróży zmienia się w zależności od:

- opóźnień na drodze, którą wybiera jako podstawową;
- czasu podróży na drogach alternatywnych;
- poziomu zatłoczenia na drodze alternatywnej;
- źródła informacji.

Informacja o stratach czasu na drogach alternatywnych jest głównym czynnikiem wpływającym na podjęcie decyzji o skorzystaniu z objazdu. Powiązanie pomiędzy wykorzystaniem przez kierowców informacji o ruchu przekazywa-

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: J. Oskarbski 25%, M. Zawisza 20%, M. Miszewski 20%, K. Żarski 20%. K. Jamroz 15%

nej za pomocą radia, a informacji prezentowanej za pośrednictwem Tablic Zmiennej Treści w obszarze Amsterdamu zostało opisane za pomocą modelu dwóch zmiennych [3]. Autorzy badania zaobserwowali, że kierowcy, na których wpływ miała informacja przesłana za pomocą radia, częściej korzystali również z informacji na Tablicach Zmiennej Treści. Reakcja kierowców na informacje przedstawione na Tablicach Zmiennej Treści została zbadana w Londynie [4]. Dane zostały przeanalizowane za pomocą modeli regresji logistycznej. Wyniki pokazały, że informacja przekazana za pomocą TZT postrzegana była jako użyteczna, jednak tylko 20% kierowców postanowiło skorzystać z objazdu. Analiza ankiet internetowych przeprowadzonych w Holandii [5] pokazała, że sugestia drogi alternatywnej jest najbardziej preferowaną przez kierowców informacją (następne to lokacja, długość oraz przyczyna zatoru). Wpływ TZT na wybór trasy, prędkości oraz zachowania kierowców został również przeanalizowany w [6]. Analiza danych empirycznych potwierdziła efektywność TZT i wpływ informacji na przekierowanie ruchu na trasy alternatywne. Badanie polegające na określeniu postrzegania TZT na autostradach w Wisconsin [7] pokazało, że kierowcy rozważali objazdy, w momencie kiedy na TZT wyświetlała się informacja o wzroście czasu podróży z powodu wypadku, zatoru lub robót drogowych przynajmniej przez 15 minut.

Można stwierdzić, że głównym zadaniem SIK jest przekazywanie kierowcom informacji o [8]:

- czasie podróży pomiędzy dwoma lokalizacjami,
- warunkach ruchu na drogach,
- aktualnych robotach drogowych,
- specjalnych wydarzeniach z instrukcjami dla kierowców,
- planowanych robotach drogowych,
- niekorzystnych warunkach pogodowych,
- wypadkach drogowych.

Systemy Informacji dla Kierowców w Polsce

Obecnie w Polsce obserwuje się liczne wdrożenia systemów ITS, zarówno w obszarach miejskich, jak i na autostradach i drogach ekspresowych. Jedną z głównych informacji przekazywanych podróżnym w systemach miejskich są czasy przejazdu różnymi trasami pomiędzy charakterystycznymi punktami w mieście. Takie systemy zostały zaimplementowane m.in. w Szczecinie, Wrocławiu i Bydgoszczy. Zarządcy dróg wykorzystują TZT również do przekazywania kierowcom informacji, np. o zmianach organizacji ruchu w sieci ulicznej, wypadkach, jak również informacji promujących bezpieczną jazdę.

Inne rozwiązanie SIK – bez montażu dedykowanych urządzeń TZT – można znaleźć w Białymstoku, gdzie istniejące drogowskazy zostały wyposażone w elektroniczne moduły wyświetlające wartości liczbowe (czasy przejazdu).

Przykładem zamiejskiego SIK jest Inteligentny System Sterowania Ruchem Regionu Podhala (ISSRRP). Jest to obszarowy system (zlokalizowany na drogach krajowych i wojewódzkich) wykorzystujący pomiary systemu sterowania ITS bazującego na informacji uzyskanej z urządzeń systemowych. Komunikaty przekazywane za pomocą GSM/GPS, Internetu oraz urządzeń TZT dotyczą czasu przejazdu pomiędzy różnymi miejscowościami (Zakopane, Rabka Zdrój, Kraków, Myślenice, Nowy Targ) z informacją graficzną pokazującą warunki ruchu na różnych drogach [9].

Efektywność systemu ISSRRP w przypadkach różnych incydentów została zbadana w [10]. Przeanalizowano rozkład ruchu w momencie trwania wypadku drogowego, mającego wpływ na ograniczenie przepustowości odcinków drogowych w analizowanym obszarze. Zamknięcie odcinka drogowego zostało przeanalizowane za pomocą narzędzi symulacyjnych. Analizy pokazały pozytywny wpływ systemu na dyspersję ruchu, co skutkowało poprawą warunków ruchu w sieci drogowej w momencie incydentu.

SIK został również zaimplementowany w sieci autostrad (m.in. na autostradzie A2). Informacja dla kierowców przekazywana za pomocą TZT i ZZT skupia się przede wszystkim na zarządzaniu prędkością uzupełnioną informacją o utrudnieniach i niebezpieczeństwach (wypadki, kolejki pojazdów, spadek przyczepności nawierzchni, roboty drogowe), dodatkowo przekazywana jest informacja o trasach alternatywnych pozwalająca na uniknięcie zaburzeń w ruchu.

Jednym z większych projektów ITS realizowanych aktualnie w Polsce jest Zintegrowany System Zarządzania Ruchem TRISTAR. Swoim zasięgiem obejmuje on główny układ drogowy trzech sąsiadujących ze sobą miast – Gdańska, Sopotu i Gdyni. System wspomaga działania dotyczące zarządzania ruchem oraz transportem publicznym w zakresie optymalnego wykorzystania infrastruktury drogowej, poprawy bezpieczeństwa ruchu oraz ograniczenia negatywnego wpływu ruchu miejskiego na środowisko. Spośród głównych modułów systemu TRISTAR można wyróżnić System Sterowania Ruchem Drogowym, System Zarządzania Ruchem Pojazdów Transportu Zbiorowego wraz z modułem udzielania im priorytetów w ruchu, System Monitorowania Ruchu i jego Parametrów z wykorzystaniem nadzoru wizyjnego, System Planowania Ruchu (wykorzystujący wielopoziomowy model podróży) oraz systemy informacji składające się z modułu przeznaczonego dla kierowców, a także pasażerów transportu zbiorowego.

Wszystkie elementy systemu TRISTAR wykorzystują liczne urządzenia detekcji pojazdów, na które składają się pętle indukcyjne i kamery wideo rozmieszczone na całym obszarze funkcjonowania systemu, nadajniki GPS zainstalowane w pojazdach transportu zbiorowego oraz odbiorniki wykrywające położenie urządzeń mobilnych.

W celu przekazania rzetelnej informacji o ruchu System Informacji dla Kierowców wykorzystuje dane gromadzone przez pozostałe moduły systemu. Za pomocą dedykowanych algorytmów dane te są przetwarzane i prezentowane kierowcom za pomocą urządzeń zainstalowanych na drogach. W dalszej części przedstawiono zarys funkcjonowania Systemu Informacji dla Kierowców zaimplementowanego w systemie TRISTAR na obszarze Gdyni [6].

Rola Systemu Informacji dla Kierowców w systemie TRISTAR

System Informacji dla Kierowców został przeznaczony do prezentacji zgromadzonych i przetworzonych danych o ruchu pochodzących z szeroko pojętych urządzeń detekcji systemu TRISTAR.

Informowanie kierowców o zaburzeniach w ruchu odbywa się za pośrednictwem tablic i znaków zmiennej treści zainstalowanych w strategicznych miejscach sieci drogowej Gdyni. Odczyt prezentowanych informacji możliwy jest również za pośrednictwem strony internetowej. System Informacji dla Kierowców w zakresie danych prezentowanych na tablicach i znakach zmiennej treści stanowi źródło informacji dla kierowców w zakresie:

- bieżącego czasu przejazdu głównymi odcinkami sieci drogowej;
- aktualnych zdarzeń i utrudnień w ruchu, obejmujących wypadki, awarie sygnalizacji świetlnej, awarie infrastruktury drogowej i technicznej, prowadzone prace drogowe, wyłączenia z ruchu, imprezy masowe;
- planowanych zdarzeń i utrudnień w ruchu obejmujących prace drogowe, remonty, wyłączenia z ruchu, imprezy masowe;
- bieżących warunków atmosferycznych na drogach (m.in. o temperaturze, wilgotności, sile i kierunku wiatru itd.);
- ostrzeżeń o warunkach pogodowych niebezpiecznych dla ruchu (np. śliska nawierzchnia, boczny wiatr, mgła itd.) pochodzących z automatycznych stacji pogodowych zintegrowanych z systemem.

Informacje wyświetlane za pośrednictwem Tablic Zmiennej Treści mają za zadanie przekazać zalecenia co do podjęcia konkretnych zachowań na drodze, natomiast nie są one obligatoryjne i decyzja o dostosowaniu się do nich pozostaje w gestii kierowcy (np. zalecenie skorzystania z objazdu). W przypadkach braku incydentów w sieci podstawową informacją prezentowaną na tablicach jest czas przejazdu w danym kierunku za pośrednictwem dwóch tras alternatywnych. Ze względu na różnorodność celów i motywacji podróży ta informacja stanowi dla kierowców wyłącznie element uzupełniający, gdyż często nie mają oni możliwości zmiany swojej decyzji, co do wyboru trasy i miejsca przeznaczenia podróży.

Znaki Zmiennej Treści stanowią element organizacji ruchu i informacje na nich prezentowane obligują kierowców do stosowania się do wyświetlanych komunikatów, np. zmiany ograniczenia prędkości.

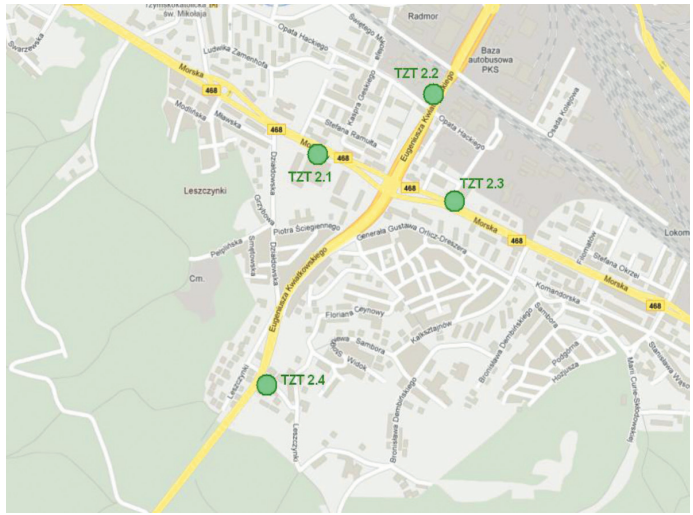
Zasadniczym celem Systemu Informacji dla Kierowców jest zapewnienie płynnego i bezpiecznego przepływu ruchu w obrębie sieci drogowej objętej systemem zarządzania ruchem. Jak w każdej dziedzinie życia, właściwa i rzetelna informacja pozwala na odpowiednie zaplanowanie podejmowanych działań, ograniczając tym samym ryzyko ponoszenia dodatkowych strat (np. czasu lub kosztów). W coraz bardziej nasyconych ruchem sieciach drogowych bieżąca informacja o ruchu pozwala na minimalizację strat czasu dzięki możliwości racjonalizacji podejmowanych zachowań transportowych, m.in. przez wybór optymalnej trasy lub zmianę środka transportu [11].

Infrastruktura systemu

Elementem wykonawczym Systemu Informacji dla Kierowców są Tablice Zmiennej Treści i Znaki Zmiennej Treści. Efektywność systemu zależy w znacznej mierze od właściwej lokalizacji urządzeń. Lokalizacja tablic powinna być tak dobrana, aby umożliwić zmianę decyzji o wyborze alternatywnej trasy przejazdu odpowiednio wcześnie przed skrzyżowaniami węzłowymi. Znaki Zmiennej Treści w Gdyni zlokalizowano na odcinkach dróg ruchu przyspieszonego, gdzie informacja o zmianie dopuszczalnej prędkości lub występowaniu ewentualnych zagrożeń w ruchu jest bardziej istotna.

W Gdyni zainstalowano osiem Tablic Zmiennej Treści w trzech zasadniczych lokalizacjach: skrzyżowanie ulicy Morskiej z Obwodnicą Trójmiasta, skrzyżowanie ulicy Morskiej z Trasą Kwiatkowskiego (rys. 1) oraz w ciągu Drogi Gdyńskiej i w okolicy jej skrzyżowania z ulicą Wielkopolską (rys. 2). Informacje dla kierowców przekazywane są za pomocą wielkoformatowego ekranu LED. Komunikaty wyświetlane na urządzeniach są uruchamiane automatycznie, tj. system sam proponuje treść w zależności od sytuacji na drodze, lub manualnie przez operatorów w Centrum Zarządzania Ruchem.

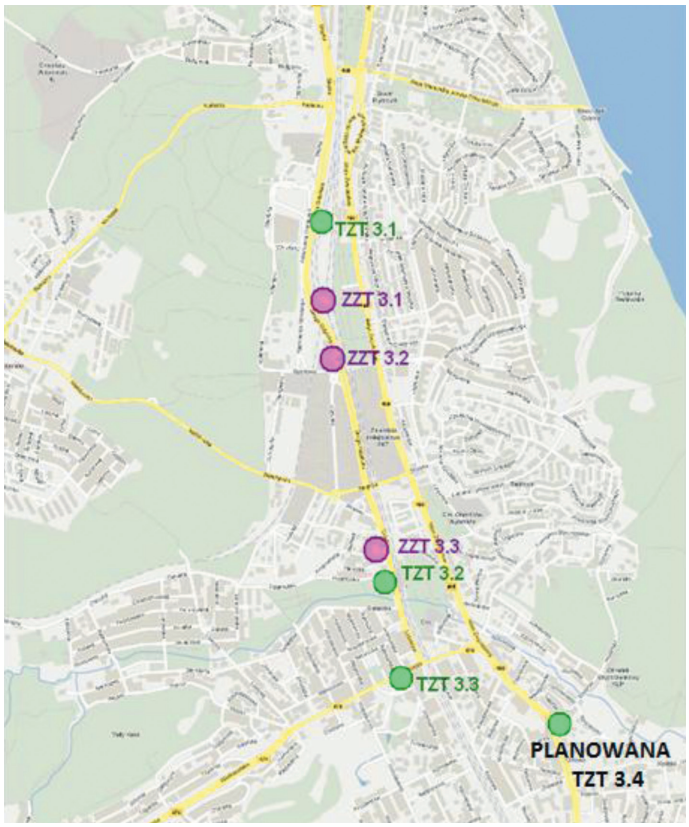
Większość Tablic Zmiennej Treści została zlokalizowana w taki sposób, by umożliwić przekazanie informacji o wyborze trasy alternatywnej w kierunku Gdańska za pośrednictwem Obwodnicy Trójmiasta lub głównej arterii komunikacyjnej przebiegającej przez centra Gdyni i Sopotu. Trójmiejska Obwodnica w ostatnich latach zaczęła pełnić funkcję drogi wewnątrz aglomeracyjnej. W sezonie letnim obsługuje bardzo duży ruch turystyczny w kierunku Półwyspu Helskiego, przez co często występują utrudnienia w płynności przejazdu. Te czynniki powodują zasadność lokalizacji tablic zmiennej treści w opisywanych miejscach.



Rys. 1. Lokalizacja TZT w obrębie skrzyżowania ul. Morskiej z Trasą Kwiatkowskiego w Gdyni
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem map google.pl

Najbardziej rozbudowany układ lokalizacji tablic zmiennej treści przewidziano na skrzyżowaniu ulicy Morskiej z Trasą Kwiatkowskiego. Każdy wlot węzła wyposażony jest w tablicę, co umożliwia przekazanie informacji o trasach alternatywnych w różnych kierunkach oraz o ewentualnych incydentach na każdej z dróg wylotowych. Trasa Kwiatkowskiego prowadzi do gdyńskiego portu i cechuje się znacznym udziałem w ruchu pojazdów ciężarowych. Podatność drogi na występowanie utrudnień z tym związanym jest jednym z kryteriów uzasadniających lokalizację tablic na tym skrzyżowaniu.

Przedstawiona na rysunku 2 Droga Gdyńska stanowi alternatywny ciąg uliczny dla głównej arterii komunikacyjnej Trójmiasta. Tablice zlokalizowane w jej ciągu pozwalają na przekazanie informacji o czasach przejazdu alternatywnymi trasami w różnych kierunkach oraz o ewentualnych incydentach. Tablice oznaczone jako 3.1 i 3.3 mają za zadanie poinformowanie kierowców o sposobie dojazdu lub przejazdu przez centrum miasta, natomiast tablica 3.2. sugeruje wybór trasy w kierunku Gdańska. Obecnie w ramach rozszerzenia systemu TRISTAR realizowana jest inwestycja mająca na celu rozbudowę systemu o kolejną Tablicę Zmiennej Treści nr 3.4 na alei Zwycięstwa. Urządzenie będzie pokazywało czas dojazdu do Centrum Gdyni, jak również informowało o utrudnieniach m.in. na ulicy Wielkopolskiej. Ciąg Drogi Gdyńskiej jest drogą główną ruchu przyspieszonego, dlatego w obu kierunkach zainstalowano ZZT. Dzięki nim możliwa jest dynamiczna regulacja dopuszczalnej prędkości, informowanie o występujących utrudnieniach itp. (rys. 3)



Rys. 2. Lokalizacja TZT i ZZT w ciągu Drogi Gdyńskiej oraz na al. Zwycięstwa w Gdyni
Źródło: opracowanie własne z wykorzystaniem map google.pl

Rys. 3. Przykładowy komunikat na ZZT, Droga Gdyńska
Źródło: www.tristar.gdynia.pl

Znaki Zmiennej Treści to urządzenia, które składają się z kilku ekranów LED, z których każdy pełni funkcję niezależnego znaku mającego taką samą moc prawną jak znak pionowy stanowiący element stałej organizacji ruchu.

Podobnie jak w przypadku TZT, za wyświetlanie znaków odpowiada automatycznie system nadrzędny lub operator w Centrum Zarządzania. W celu zachowania ciągłości i koordynacji pracy w systemie zostały przygotowane scenariusze i procedury, które w przypadku zaistnienia konkretnych warunków (np. atmosferycznych), wyświetlają ograniczenie prędkości wraz z dodatkowym stosownym znakiem lub komunikatem tekstowym.

Komunikaty na urządzeniach ZZT i TZT

Opisane we wcześniejszym punkcie lokalizacje urządzeń odpowiadają strategicznym punktom w sieci ulicznej Gdyni. Głównym kryterium, jakim kierowano się przy ich wyborze, była możliwość kierowania na trasę alternatywną. Dzięki temu w przypadku wystąpienia zdarzenia na jednej z tras, istnieje możliwość wskazania objazdu. W systemie TRISTAR przewiduje się w przypadku Tablic Zmiennej Treści wyświetlanie następujących schematów informacji w trybie zwykłym (automatycznym) [11]:

- TZT będą wyświetlały czasy przejazdu pomiędzy alternatywnymi trasami;
- ZZT będą wyświetlały ograniczenie prędkości, które w przypadku wykrycia niebezpiecznych warunków meteorologicznych (np. gołoledź) zostanie zmniejszone i dodatkowo pojawi się stosowny znak ostrzegawczy oraz komunikat tekstowy.

W przypadku wykrycia przez system zdarzenia drogowego następuje zaproponowanie komunikatu operatorowi celem jego zatwierdzenia oraz realizacji (tryb półautomatyczny):

- TZT w tym trybie przekazywać będą informację o zaburzeniu w sieci i jego miejscu (system szacuje czasy przejazdu między różnymi odcinkami sieci, w przypadku wzrostu czasu powyżej progu ostrzegawczego system reaguje);
- ZZT w przypadku wykrycia na najbliższym skrzyżowaniu przed znakiem kolejki pojazdów będą podobnie jak w trybie automatycznym wyświetlały stosowne ograniczenie prędkości wraz z znakiem ostrzegawczym A-33.

W przypadku planowanych zdarzeń (np. remonty) operator umieszcza zdarzenie na mapie, co jest interpretowane odpowiednio przez system (tryb manualny) jako nowe zdarzenie w sieci drogowej:

- TZT wraz z ZZT przekazują informacje o planowanych zdarzeniach oraz zdarzeniach nagłych występujących poza obszarem systemu, dla których czas zniwelowania wpływu na sieć transportową jest przewidywalny.

Powiązanie SIK z podsystemami systemu TRISTAR

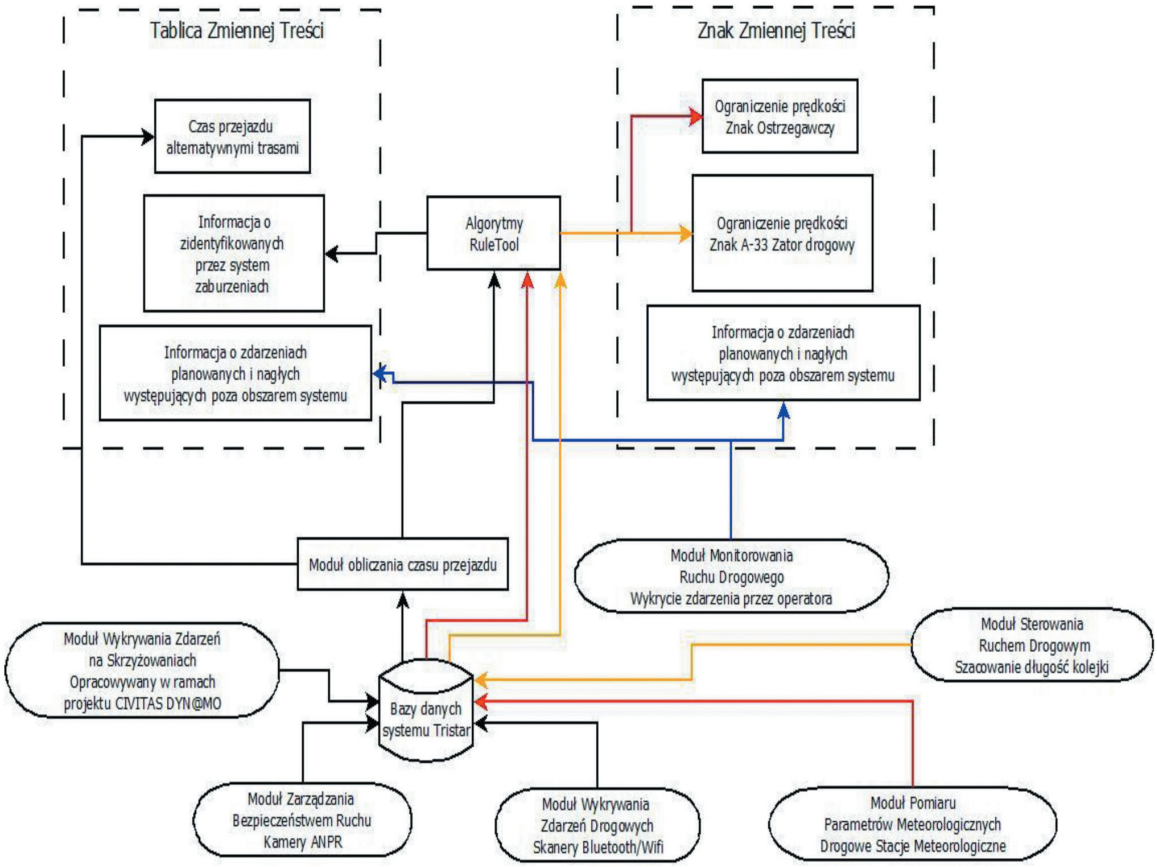
Zarówno automatyczny, jak i półautomatyczny tryb pracy SIK bazuje na danych pobieranych z innych podsystemów zintegrowanego systemu zarządzania ruchem. Wszystkie informacje płynące z systemu nadrzędnego przechowywane są w dedykowanych bazach danych. Jedną z takich baz jest Integracyjna Baza Danych (IDB), do której trafiają najbardziej aktualne informacje z każdego z modułów systemu TRISTAR. Każda informacja przekazywana z danego podsystemu do IDB jest równocześnie pobierana przez odpowiednie moduły systemu zarządzania ruchem. SIK do prawidłowej pracy wymaga m.in. informacji o [11]:

- stanie nawierzchni, widoczności oraz sile wiatru – moduł pomiaru parametrów meteorologicznych,
- czasach przejazdu na odcinkach dróg w Trójmieście – Moduł Obliczania Czasów Przejazdu (MOCP),
- wykryciu potencjalnego zdarzenia drogowego – Moduł Wykrywania Zdarzeń Drogowych (MWZD) oraz MOCP,
- długości kolejki na skrzyżowaniach za urządzeniami ZZT – Moduł Sterowania Ruchem Drogowym,
- zdarzeniach drogowych wykrywanych przez operatorów systemu TRISTAR – Moduł Monitorowania Ruchu Drogowego.

Na rysunku 4 przedstawiono powiązanie poszczególnych elementów systemu TRISTAR z Systemem Informacji dla Kierowców.

Algorytmy SIK

Wdrożone w systemie TRISTAR oprogramowanie firmy Gevas składa się z wielu komponentów. Jednym z nich jest narzędzie RuleTool służące do projektowania algorytmów sterowania komponentami wykonawczymi na podstawie danych zawartych w systemie TRISTAR. Za pomocą tego narzędzia inżynier ruchu może sparametryzować, jakie powinny zostać spełnione warunki brzegowe, aby wyświetlił się dany rodzaj komunikatu dla pracy w trybie automatycznym oraz półautomatycznym. Krok obliczeniowy każdego z algorytmów zapisanego za pomocą RuleTool wynosi jedną minutę. Podczas każdego kroku obliczeniowego pobierane są dane z odpowiednich komponentów IDB, następnie są one porównywane z warunkami brzegowymi poszczególnych algorytmów. W przypadku, kiedy wszystkie warunki są spełnione, uruchomiony jest tok pracy, którego zadaniem jest wyświetlenie na przypisanych do danego algorytmu urządzeniach zdefiniowanych treści. Tok pracy jest aktywny do momentu, kiedy jeden z warunków koniecznych przestanie być spełniony. W tym samym czasie uruchomionych może być kilka toków pracy – w takim przypadku wyświetlany jest komunikat toku pracy posiadającego wyższy priorytet [11]. Przykładowy algorytm związany z wpływem warunków atmosferycznych na wyświetlenie odpowiednich informacji na znaku zmiennej treści został przedstawiony na rysunku 5.



Rys. 4. Powiązanie SIK z innymi modułami systemu TRISTAR
Źródło [11]

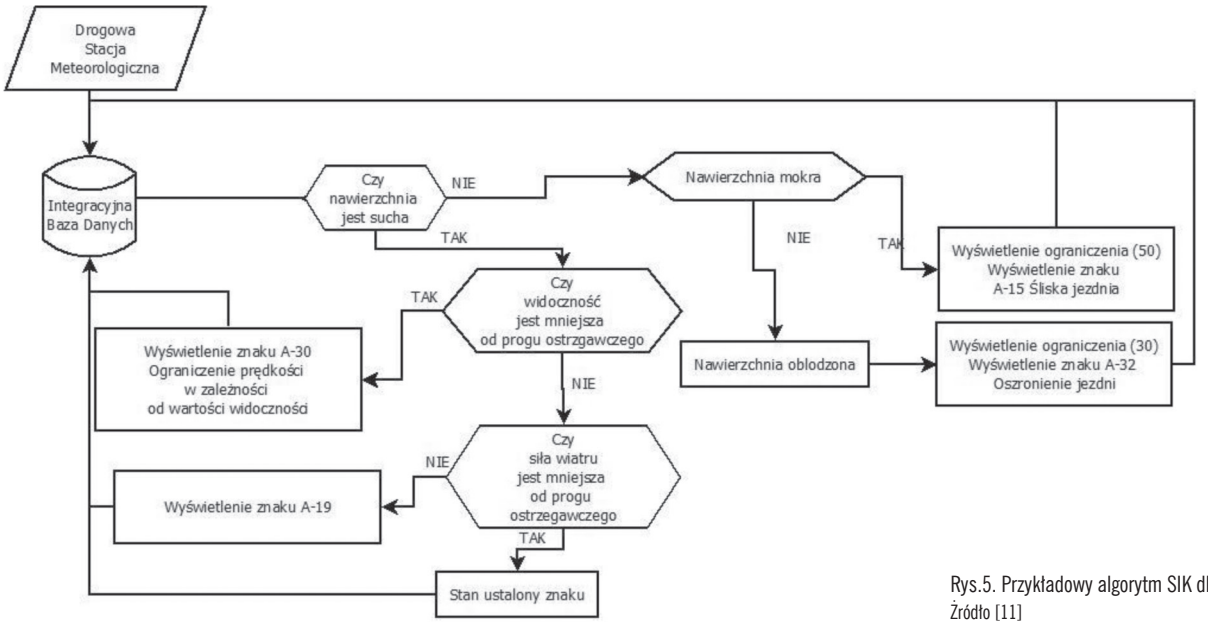
Ponadto w ramach projektu unijnego CIVITAS DYN@MO na terenie Gdyni wdrożony zostanie moduł wykrywający incydenty w obszarze skrzyżowań. Moduł ten, wykorzystując algorytmy genetyczne oraz metody statystyczne, będzie analizował dane z detektorów zlokalizowanych na skrzyżowaniach i w momencie wykrycia zaburzenia przekaże informację operatorom Centrum Zarządzania Ruchem, którzy będą mogli zainicjować odpowiednie strategie sterowania wykorzystujące System Informacji dla Kierowców.

Podsumowanie

Korzyści płynące z zastosowania Systemów Informacji dla Kierowców polegają przede wszystkim na zwiększeniu poziomu bezpieczeństwa ruchu oraz niezawodności sieci transportowej. Doświadczenia innych miast i regionów wskazują na zasadność wdrożenia rozbudowanego systemu informacji w województwie pomorskim, zarówno w kontekście funkcjonalnym, jak i obszarowym. Algorytmy zaimplementowane w systemie TRISTAR mogą być podstawą do dalszego rozwoju Systemów Informacji dla Kierowców. Jednym z obszarów dalszych badań będzie opracowanie metodyki ograniczania prędkości w zależności od aktualnych warunków pogodowych. Niezbędne będą dalsze badania w zakresie doboru lokalizacji urządzeń TZT i ZZT, jak również w zakresie czytelności przekazywanych informacji. Obecnie nie ma precyzyjnych regulacji prawnych, wytycznych czy metodyki, która pozwoliłaby na wsparcie podczas wdrażania takich systemów w miastach oraz na drogach szybkiego ruchu. Mimo tego w najbliższych latach należy spodziewać się rozwoju infrastruktury SIK. Takie plany dotyczą również Trójmiasta oraz innych obszarów województwa pomorskiego (m.in. system informacji dla kierowców podróżujących na Półwysep Helski). Informacje pozyskane z systemów detekcji TRISTAR mogą stanowić bazę do rozwoju modeli dynamicznego rozkładu ruchu, które są niezbędnym elementem w modelowaniu procesów transportowych służących do bieżącego zarządzania ruchem drogowym, m.in. z wykorzystaniem Systemu Informacji dla Kierowców.

Literatura

1. Kattan L., Nurul Habib K.M., Tazul I., Shahid N., *Information Provision and Driver Compliance to Advanced Traveller Information System Application: Case Study on the Interaction between Variable Message Sign and other Sources of Traffic Updates in Calgary*, Canada. Can. J. Civ. Eng. 38, 1335–1346. Published by NRC Research Press, 2011.
2. Polydoropoulou A., Ben-Akiva M., Khattak A., Lauprete G., *Modeling Revealed and Stated En-route Travel Response to Advanced Traveler Information Systems*, Transportation Research Record, 1996, No. 1537.
3. Emmerink R., Nijkamp P., Rietveld P., Van Ommeren J.N., *Variable Message Signs and Radio Traffic Information: An Integrated Empirical Analysis of Drivers' Route Choice Behavior*, Transportation Research Part A, Policy and Practice 30(2), 1996.
4. Chatterjee K., Hounsell N.B., Firmin P.E., Bonsall P.W., *Driver Response to Variable Message Sign Information in London*, Transportation Research Part C 10(2), 2002.
5. Muizelaar J., Arem B.V., *Drivers' Preferences for Traffic Information for Non-recurrent Traffic Situations,* Transportation Research Record 2018, Transportation Research Board, 2006.
6. Erke A., Sagberg F., Hagman R., *Effects of Route Guidance Variable Message Signs (VMS) on Driver Behavior,* Transportation Research Part F, 2007, Volume 10, Issue 6.
7. Ran B., Barrett B., Johnson E., *Evaluation of Variable Message Signs in Wisconsin: Driver Survey*, Final Report No. 0092-45-17, Wisconsin Department of Transportation, 2004.
8. Wisconsin Department of Transportation Intelligent Transportation Systems (ITS) Manual, 2000, http://www4.uwm.edu/cuts/itsdm/chap6.pdf - dostęp: 10.02.2015
9. Zakrzewski P., *Inteligentny System Sterowania Ruchem Regionu Podhalańskiego*, V Polish ITS Congress, Warszawa 2012.
10. Oskarbski J., Jamroz K., Oskarbska I., *Analiza i ocena efektywności Inteligentnego Systemu Sterowania Ruchem Regionu Podhalańskiego – ISSRRP*, Politechnika Gdańska, na zamówienie Zarządu Dróg Regionalnych w Krakowie, 2013.
11. Oskarbski J., Zawisza M., Miszewski M., *Information System for Drivers within the Integrated Traffic Management System – TRISTAR, Springer International Publishing*, Switzerland 2015. J. Mikulski (Ed.): TST 2015, CCIS 531.



Rys.5. Przykładowy algorytm SIK dla Znaku Zmiennej Treści
Źródło [11]

Wyznaczanie prędkości średniej pojazdów transportu zbiorowego na podstawie danych z systemu zarządzania ruchem[1]

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 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, 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.

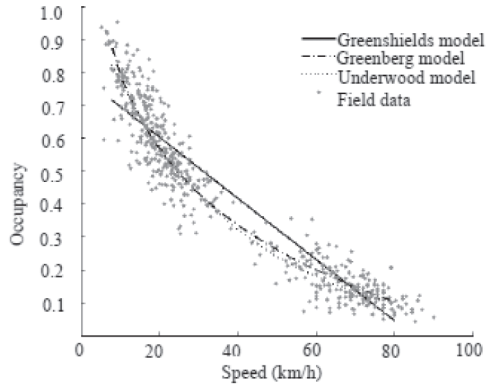
Większość analiz skupia się przede wszystkim na określaniu czasu przejazdu pomiędzy poszczególnymi punktami, pomijany jest natomiast aspekt osiąganej przez pojazd prędkości na danym typie odcinka [3]. Teoretyczne modele sieci zwykle nie rozróżniają również typów odcinków pod kątem ich klasyfikacji technicznej [4]. Istnieje więc wyraźna potrzeba rozpoznania metody skupiającej się na badaniu prędkości w 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 natężeniu 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:

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

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]

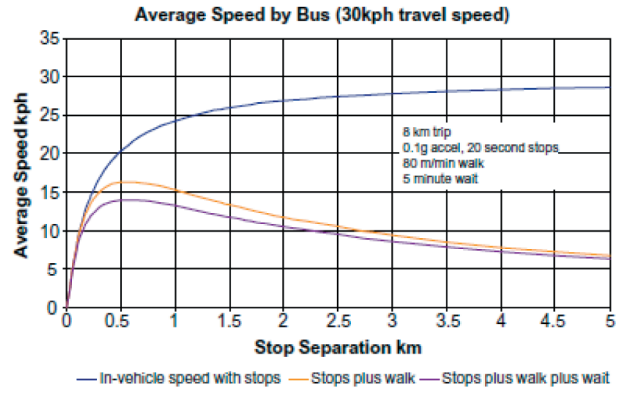
Autorzy wykorzystali następnie bazujący na rachunku prawdopodobieństwa algorytm sieci bayesowskiej (Bayesian network) w środowisku MATLAB do określenia zależności pomiędzy zajętością pętli a prędkością. Stosując różne interwały pomiarowe, uzyskano wysoką zgodność pomiędzy prędkością estymowaną a modelowaną, 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 spędzony w pojeździe stanowi niewielki udział ogólnego czasu podróży, co ma też bardzo istotny wpływ na prędkość jazdy. Problem ten zilustrowany został przez Lowsona [4]. Rysunek 2 przestawia wpływ czasu dojścia do przystanku oraz czasu oczekiwania na średnią prędkość podróży autobusem, którego prędkość jazdy w sieci, według przyjętego modelu, wynosi 30 km/h. Istotny jest również fakt, że im przystanki na trasie są rozmieszczone rzadziej, to czas dojścia do przystanku ma największy wpływ na obniżenie średniej prędkości podróży.



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

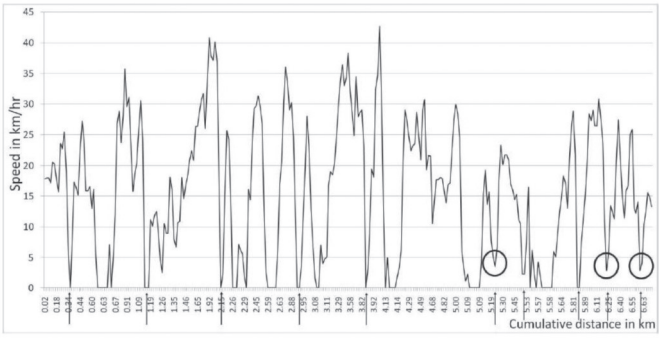
Liczba zmiennych koniecznych do założenia w modelach powoduje, że często uzyskane wyniki mogą znacznie różnić się od rzeczywistych prędkości uzyskiwanych przez pojazdy transportu zbiorowego. W modelach sieciowych szczególnie widoczne jest założenie czasu trwania obsługi przystanków. Czas ten podlega 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 obarczona 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 rozmieszczane 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 wydatny 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.

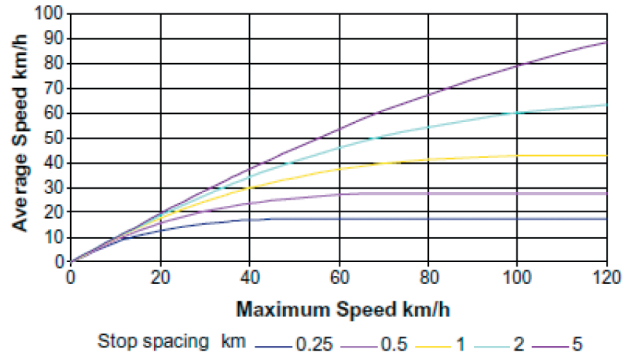


Rys. 3. Wykres prędkość względem przebytego dystansu dla przejazdu autobusu
Źródło:[8]

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 czas obsługi przystanków. Przy znacznym nasyceniu odcinka często utrudnione jest włączenie się pojazdu do ruchu przy wyjeżdżaniu z zatoki przystankowej. W tym przypadku stromość wykresu prędkości względem przebytej drogi jest mniejsza, co obrazuje mniejsze przyspieszenie ruszania. Szczegółowej analizie należy poddać 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 charakter 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).



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

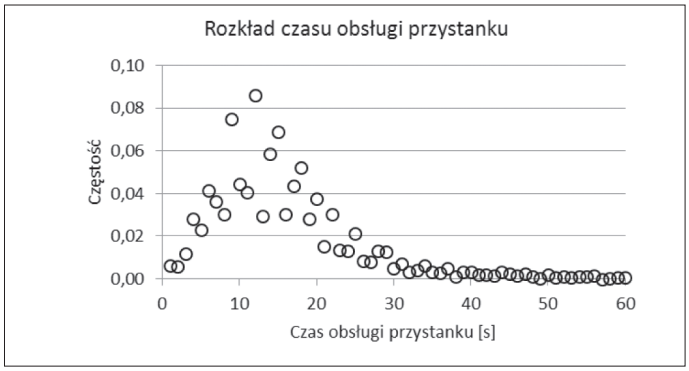
Przepustowość na wlocie skrzyżowania obliczono z wykorzystaniem SSRD, którego podstawowym elementem jest moduł sterowania ruchem pojazdów i pieszych. W ramach tego modułu pracują wszystkie sygnalizacje świetlne włączone do Systemu TRISTAR, co pozwala na rejestrowanie stanu sygnałów wyświetlanych na wszystkich sygnalizatorach. Na wytypowanych odcinkach znajduje się 37 skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, z czego wynika, że było potrzebne przypisanie 74 grup sygnałowych – jedna grupa dla każdego kierunku na każdym skrzyżowaniu. Informacja o tym, jakie jest wyświetlane światło na sygnalizatorach przypisanych do konkretnej grupy kołowej posłużyła do obliczenia przepustowości teoretycznej. W tym celu dopasowano 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 wcześnie 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. Pomiary 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.

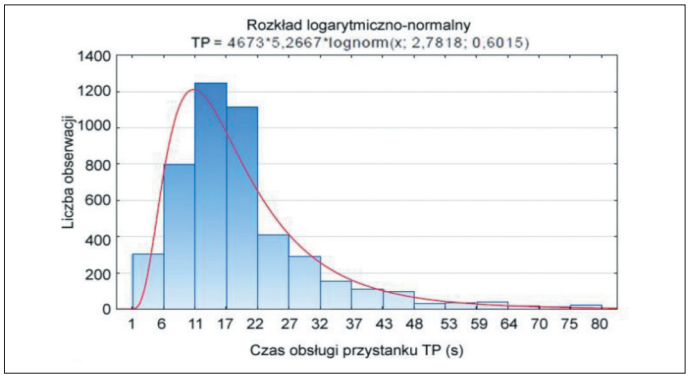
Na samym końcu należało powiązać te wszystkie trzy parametry w jeden zestaw danych do analizy. Dla każdego odcinka między przystankami sprawdzono, jakie występują skrzyżowania i jaka była liczba pasów. Dla każdego skrzyżowania w odpowiednim kierunku przypisano grupę sygnałową i przyporządkowane jej punkty 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]

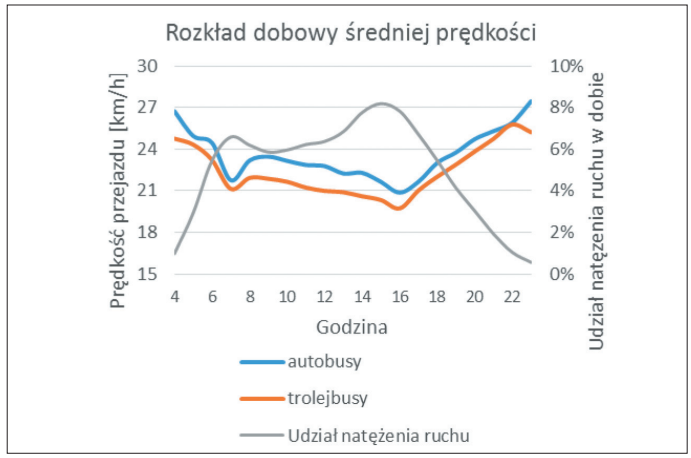
Szacowanie średniej prędkości

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 maleje średnia prędkość przejazdu pojazdów transportu zbiorowego. Zależność ta jest szczególnie zauważalna w wymienionych powyżej godzinach szczytowych.

Dodatkowo dokonano podziału prędkości pomiędzy ruch 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.

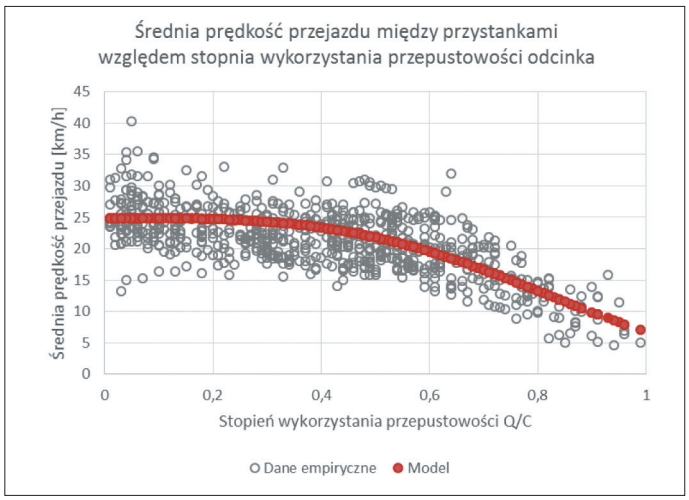
Potwierdzeniem złożoności problemu szacowania prędkości oraz czasu przejazdu pojazdów transportu zbiorowego jest próba znalezienia zależności pomiędzy tymi zmiennymi, a – przykładowo – natężeniem ruchu drogowego Q lub stopniem wykorzystania przepustowości Q/C. Stosując metodę regresji do danych empirycznych, 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:

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

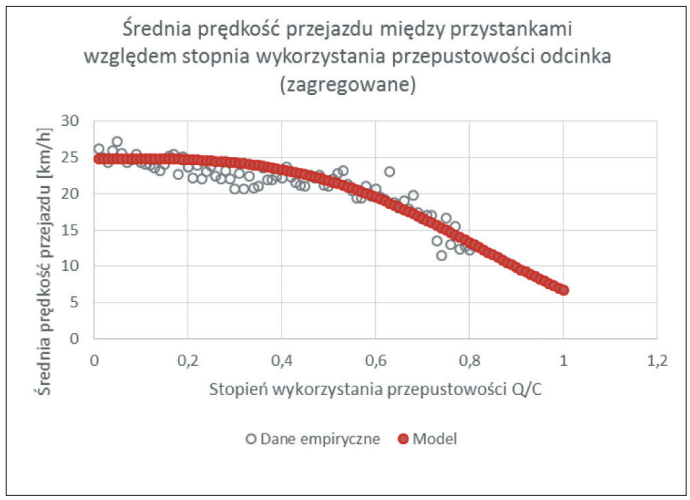
gdzie:

Vśr – 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. Oczywistym 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 jazdy konkretnego środka transportu.

Kolejnym krokiem w trakcie badań powinno być zestawienie przejazdów pojazdów transportu zbiorowego na odcinkach międzyprzystankowych z odcinkami między skrzyżowaniami. Tego typu analiza mogłaby przyczynić się do znalezienia zależności między prędkością pojazdów 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. Lowson 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.

PIOTR KISIELEWSKI
dr inż., Politechnika Krakowska, Pracownia Systemów Logistycznych, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, tel. +48 12 628 33 12, e-mail: pkisielewski@pk.edu.pl

Nowoczesna platforma projektowa i integracyjna systemów IT w transporcie zbiorowym[1]

Streszczenie: Rozkład jazdy stanowi podstawę logistyki i fundamentalny systemem informacyjny w publicznym transporcie zbiorowym. Obecnie oprogramowanie do projektowania rozkładów jazdy stanowią zaawansowane technologicznie systemy informatyczne oferujące możliwości szczegółowego projektowania sieci komunikacyjnych, automatycznego generowania kursów, zadań dla pojazdów i kierowców, symulacji ruchu pojazdów w sieci i analityki kosztów operacyjnych systemu transportowego. Systemy rozkładowe zasilają w niezbędne dane inne systemy miejskie m.in. systemy informacji pasażerskiej, dystrybucji biletów, systemy sterowania i kontroli ruchu, systemy ITS i wiele innych. W pracy przedstawiono istotne cechy nowoczesnego systemu projektowania rozkładów, stanowiącego jednocześnie platformę integracyjną systemów informatycznych komunikacji miejskiej.

Słowa kluczowe: transport zbiorowy, projektowanie sieci, planowanie i optymalizacja rozkładu jazdy, system informatyczny, platforma integracyjna

Wprowadzenie

W początkach informatyzacji programy wspomagania planowania rozkładu jazdy w transporcie zbiorowym sprowadzały się do tabelarycznego generowania kursów w oparciu o zadane parametry wyjściowe, a ich efektem były tabliczki rozkładowe na przystankach i tabele kursowe tzw. kursywki dla operatorów pojazdów. Takie rozwiązanie opiera się całkowicie na wiedzy i doświadczeniu planisty projektanta w zakresie sieci komunikacyjnej, potrzeb pasażerów i dostępnego taboru komunikacyjnego. W przypadku bardzo małych miast i systemów transportowych, doświadczenie takie może być wystarczające do sporządzenia poprawnego rozkładu jazdy, obarczone jest jednak zawsze dużym nakładem pracy i długim czasem realizacji, z możliwością popełnienia licznych błędów trudnych do oceny na etapie planu.

W przypadku większych aglomeracji miejskich i systemów transportowych, odpowiednie wspomaganie projektowania rozkładu jazdy systemem informatycznym staje się koniecznością i stanowi niezbędne wymaganie dla praktycznych projektów realizowanych przez lokalne władze samorządowe, zarządy transportu i operatorów komunikacji.

Odpowiedzią na te wymagania w ostatnich latach są zaawansowane systemy informatyczne w zakresie projektowania sieci komunikacyjnej i optymalizacji rozkładów jazdy. Profesjonalne rozwiązania w tym zakresie oferuje wąskie grono firm specjalizujących się w omawianych zadaniach [1,2,3,4,5,6,7,8]. W niniejszym artykule zaczerpnięto przykłady z systemu CityLineDesigner [1], zwanego dalej w skrócie CLD.

Wymagania nowoczesnego systemu planowania/projektowania rozkładów jazdy

Na podstawie wieloletniego doświadczenia autora w pracy w systemach transportu publicznego sformułowano wymagania, jakie powinien spełniać system w zakresie technologii informatycznych i metodyki projektowania rozkładów jazdy.

Wymagania nowoczesnego systemu w zakresie technologii informatycznej obejmują m.in.:

- technologię oprogramowania web tj. przeglądarki internetowej lub klient-serwer z serwerem aplikacji;
- jedną centralną bazę danych systemu na serwerze SQL;
- bazę danych w otwartym standardzie – baza nie może być kodowana;
- możliwość jednoczesnej zsynchronizowanej pracy wielostanowiskowej (np. jednoczesna praca edycyjna użytkowników systemu na tej samej linii komunikacyjnej lub liniach w brygadach wieloliniowych);
- możliwość dostosowania wyglądu okien edycyjnych programu przez użytkownika (np. ukrywanie niektórych opcji, zmiana położenia, kolejności);
- możliwość pracy na wielowarstwowym systemie mapy/podkładu topograficznego;
- możliwość wyboru/przełączania różnych dostępnych podkładów mapowych;
- możliwość tworzenia własnych kompozycji obszaru roboczego użytkownika systemu (panele dokowane).

W zakresie metodyki projektowania rozkładów, system poza standardowym tworzeniem kursów i łączeniem ich w brygady, powinien między innymi:

- umożliwiać definiowanie dowolnej liczby projektowych wersji rozkładu zapisanych w jednej bazie danych systemu i zatwierdzanie wybranej wersji do realizacji;
- umożliwiać projektowanie/definiowanie rozkładu na określone kalendarzowo okresy obowiązywania w jednej bazie danych systemu;
- umożliwiać dla wszystkich istotnych elementów (topologii, rozkładów, operatorów, danych) edycję danych w określonych datach kalendarzowych – aktualne dane na każdy dzień wstecz i wprzód;

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016.

- mieć możliwość porównania danych historycznych (zawartych w bazie) do danych aktualnych;
- posiadać możliwość własnego tworzenia dowolnej liczby szablonów tabliczek przystankowych przez użytkownika;
- mieć możliwość ewidencji i reprezentacji dowolnych rodzajów obiektów lokalizacji (słupki, punkty przelotowe, zabytki, obszary parkowania);
- mieć wbudowane zestawienia statystyczne odnośnie danych rozkładowych i kosztowych w postaci tabel i wykresów;
- umożliwiać wykrywanie konfliktów w rozkładzie i mieć możliwość ich reprezentacji na mapie;
- mieć możliwość autoryzowanego zatwierdzania rozkładów do realizacji;
- mieć możliwość przypisania użytkownikowi zakresu danych, na których może pracować (np. użytkownik ma przypisane tylko linie 1, 2, a co za tym idzie – nie może modyfikować danych z innych linii komunikacyjnych).

Wymienione wymagania spełnia zaledwie kilka rozwiązań na świecie i nie obejmują one wszystkich istotnych cech nowoczesnego systemu projektowania rozkładów jazdy.

Wiele rodzajów transportu – jeden system

W dużych aglomeracjach miejskich często wykorzystywane są w transporcie publicznym różne typy transportu samochodowego i szynowego, co pokazano schematycznie na rysunku 1. W większości istniejących rozwiązań softwarowych do projektowania sieci komunikacyjnych i rozkładu jazdy aplikacje obsługują oddzielne bazy danych dla każdego typu transportu. Takie rozwiązanie jest złe i stanowi istotne ograniczenie w optymalizacji /synchronizacji systemu transportowego miasta, który winien być traktowany wspólnie jako całość. Oprogramowanie CityLineDesigner wyróżnia intermodalność, kompleksowe projektowanie systemu komunikacyjnego miasta z opisem jego różnych typów transportu w jednej bazie danych.

Topologia systemu i modelowanie sieci komunikacyjnej

Nowoczesny system rozkładowy cechuje wykorzystanie rozbudowanej, szczegółowej topologii sieci komunikacyjnej, opisanej m.in. w pracach [9,10,11,12,13,14,15,16].

Rys. 1. Intermodalność systemu

Matematyczny model sieci oparty jest na grafie skierowanym, którego stopień szczegółowości zależy od poziomu analizy. Na najwyższym poziomie szczegółowości, jako węzeł grafu, modelowane jest każde stanowisko przystankowe (pozycja, słupek) i dodatkowe punkty kontrolne (przelotowe), a krawędzie grafu stanowią wszystkie odcinki międzyprzystankowe (międzysłupkowe). Wszystkim obiektom sieci odwzorowanym w grafie nadawane są istotne w komunikacji parametry-atrybuty np. pojemność stanowiska, przepustowość krawędzi.

Dane sieciowe zapisane w formie tabelarycznej mają ścisłe odpowiedniki w modelu grafowym. Graf reprezentowany jest na oddzielnej warstwie podkładu mapowego. Podkład mapowy systemu, prezentowany na oddzielnej warstwie, zasilany jest z serwerów mapowych serwisów internetowych wybranych dostawców. Na oddzielnej warstwie może być zastosowany dedykowany podkład standardowej mapy GIS [1,5].

Dane o topologii sieci mogą do systemu być wprowadzane i edytowane w tabelach, na mapie, za pomocą narzędzi graficznych lub importowane z innych systemów, jak pokazano na rysunku 2 [1]. Każda zmiana w tabelach bazy jest automatycznie odzwierciedlana na mapie sieci komunikacyjnej. Szczególnie interesująca jest możliwość automatycznego wprowadzania danych z urządzeń mobilnych np. rejestrujących dokładnie trasę pojazdu, jego trajektorię ruchu i zatrzymania na przystankach [13,14].

Rys. 2. Topologia i modelowanie sieci w systemie CityLineDesigner

Nowatorskie technologie informatyczne

CityLineDesigner to kompleksowy, zintegrowany system informatyczny do konstruowania projektowania rozkładów jazdy [1], uwzględniający w jednej bazie danych:

- różne typy transportu zintegrowane w jednym rozkładzie,
- wielu przewoźników działających wspólnie dla miasta,
- wspólne przewozy dla różnych jednostek administracyjnych,
- rzeczywiste dane o natężeniu ruchu pasażerskiego.

System powstał w odpowiedzi na podstawowe problemy organizatorów komunikacji, takie jak:

- brak krajowego, nowoczesnego rozwiązania do edycji rozkładów;

- problemy technologiczne dotychczasowych rozwiązań;
- problemy z wymianą danych (integracją) ze stosowanymi systemami ITS;
- rozwój nowych technologii informacji pasażerskiej i konieczność współpracy z nimi „On-Line”;
- nowe trendy topologii i modelowania sieci komunikacyjnej.

Zapotrzebowanie rynku zbiegło się z dynamicznym rozwojem technologii informatycznych i narzędzi matematycznych, które umożliwiły realizację w systemie funkcjonalności na miarę oczekiwań współczesnych organizatorów komunikacji. W procesie tworzenia oprogramowania CityLineDesigner wykorzystano rozwój w trzech obszarach:

- nowoczesnych algorytmów matematycznej optymalizacji zwłaszcza metaheurystycznych,
- technologii mobilnej wspierającej działanie aplikacji instalowanych w urządzeniach mobilnych,
- technologii webowej z jej najnowszymi osiągnięciami w budowie aplikacji mapowych.

Graficzna, intuicyjna edycja punktów terenowych, przystanków i linków (odcinków międzyprzystankowych) na podkładzie mapowym oraz samodzielny wybór podkładu mapowego przez użytkownika – mapy własne lub z serwerów mapowych Google Maps, OpenStreet Maps, Ovi Maps (rysunek 3) – stanowi niewątpliwy atut systemu.

Proces projektowania

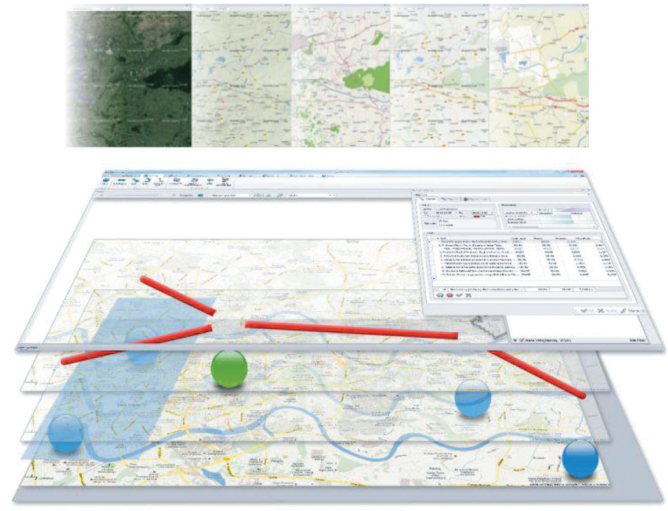
Na rysunku 5 pokazano schematycznie proces projektowy rozkładu jazdy, z zaznaczeniem procesów w aspekcie innowacji, uniwersalności, wizerunku i finansów.

Budowa topologii sieci komunikacyjnej stanowiąca bazowy etap projektu może być wspomagana przez technologie mobilne, co pokazano schematycznie na rysunku 4., m.in. poprzez automatyczne przenoszenie tras, przystanków i czasów przejazdów z aplikacji mobilnych do systemu [1,5,10].

W kolejnym etapie na podstawie danych o rzeczywistych i przewidywanych potokach pasażerskich konstruowane są warianty tras linii komunikacyjnych i kombinacje rozkładów na różne dni tygodnia. W kolejności ręcznie lub automatycznie generowane są kursy rozkładowe transportu, brygady, czyli zadania dla pojazdów i w końcu służby planowe dla kierowców.

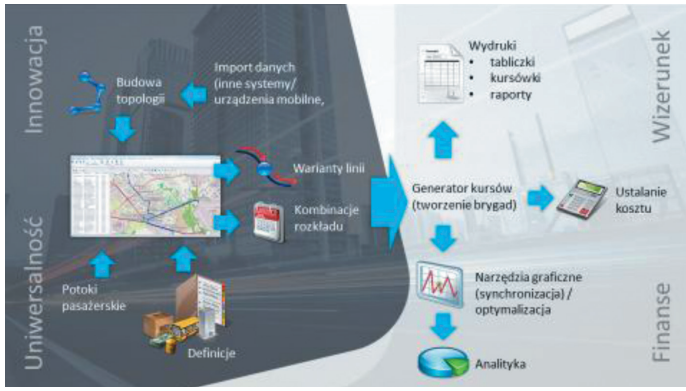
Finalnym efektem wizualnym projektu są wydruki tabliczek przystankowych z rozkładem, kursówek pojazdów i innych raportów. W aspekcie finansowym i statystycznym system automatycznie dokonuje analizy kosztów planowanego transportu i przeglądu analitycznego pod kątem poprawności projektu zgodnie z założeniami wyjściowymi.

Na rysunku 6 przedstawiono typowe narzędzia graficzne służące do edycji i generacji planowych kursów pojazdów w postaci wykresów piłokształtnych i blokowych



Rys. 3. Wybór warstw i podkładu mapowego przez użytkownika

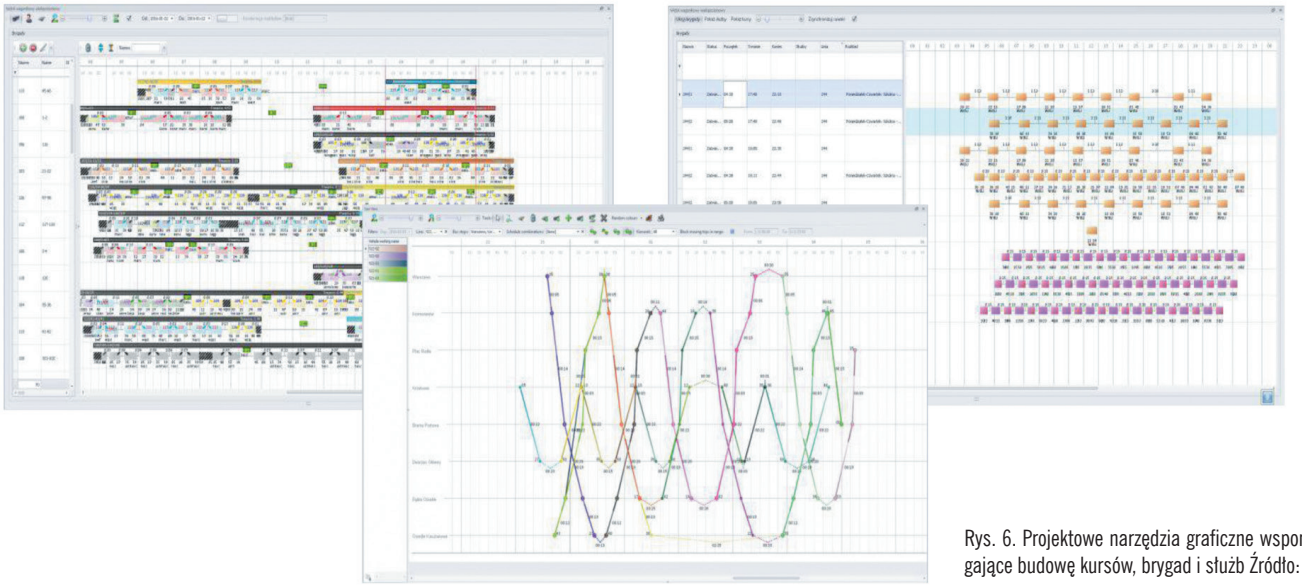
Rys. 4. Wykorzystanie technologii mobilnych w projektowaniu sieci komunikacyjnej i rozkładu jazdy



Rys. 5. Procesy realizowane w systemie projektowania rozkładów jazdy

[1,2,5,6]. Wykresy te służą również do wizualizacji i składania kursów w zadania dla pojazdów tzw. brygady oraz zadania dla kierowców tzw. służby.

Zestawy kursów rozkładowych, brygad i służb mogą być generowane ręcznie lub automatycznie z wykorzystaniem różnych automatów działających w oparciu o zdefiniowane przez użytkownika parametry.



Rys. 6. Projektowe narzędzia graficzne wspomagające budowę kursów, brygad i służb Źródło: [1]

Synchronizacja kursów

Synchronizacja kursów w planowanych rozkładach jazdy ma kluczowe znaczenie dla pozytywnego postrzegania transportu przez pasażerów [16,17,18,19]. W teorii i praktyce wyróżnia się dwa typy synchronizacji kursów linii komunikacyjnych:

- synchronizację węzłową, zwaną inaczej przesiadkową,
- synchronizacje interwałową, zwaną inaczej liniową.

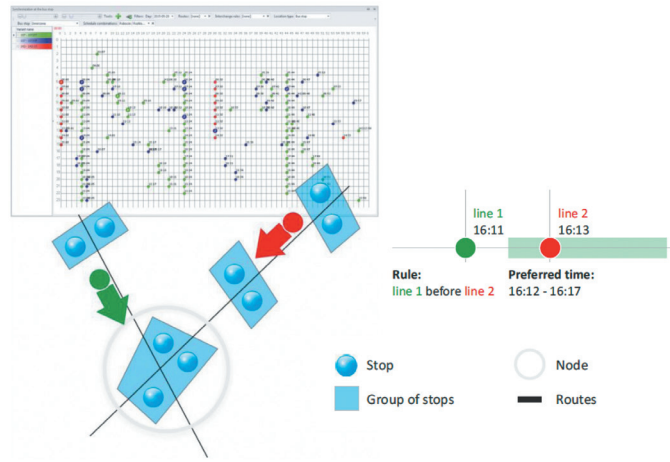
Na rysunku 7 przedstawiono schemat synchronizacji węzłowej dwóch linii komunikacyjnych.

Przez węzeł komunikacyjny rozumie się pojedynczy przystanek lub zespół przystankowy [11,12]. Celem tej synchronizacji jest takie zaplanowanie czasów kursów, aby w wyznaczonym węźle komunikacyjnym zapewnić możliwość komfortowych przesiadek pasażerów pomiędzy kursami różnych linii. Komfort oznacza tutaj minimalizację czasu oczekiwania pasażera przy zapewnieniu odpowiedniego czasu na przejście do innego pojazdu. Do tego w każdym węźle konieczne jest zdefiniowanie odpowiednich reguł przesiadkowych, określających wielkość i położenie okien czasowych dla każdej przesiadki.

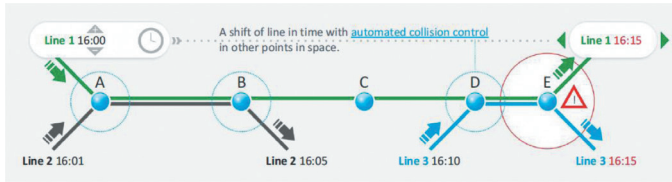
Odpowiedni punktowy wykres synchronizacyjny [1], jak na rysunku 7, umożliwia wizualizację możliwości lub braku możliwości przesiadki oraz odpowiednią korektę kursów celem odpowiedniej ich synchronizacji. Synchronizacja węzłowa ma istotne znaczenie w publicznej komunikacji międzymiastowej przy małej częstotliwości kursów, dużych odstępach czasowych pomiędzy pojazdami, gdzie uniknięcie długiego oczekiwania pasażerów podczas przesiadek jest szczególnie pożądane.

Odmienny jest cel synchronizacji interwałowej, co schematycznie przedstawiono na rysunku 8.

Ten typ dotyczy synchronizacji różnych linii na ich wspólnych odcinkach tras i gdzie dąży się do takiego zaplanowania kursów, aby pojazdy na wspólnych odcinkach kursowały w równych odstępach czasów. Do wizualizacji i ręcznej korekty kursów stosuje się punktowe wykresy synchronizacyjne podobne do przedstawionego na rysunku 7. Synchronizacja kursowa ma kluczowe znaczenie w komunikacji miejskiej, gdzie duża liczba pojazdów obsługuje linie komunikacyjne, częstotliwość kursów jest znaczna i konieczne jest uniknięcie zjawiska grupowania się pojazdów.



Rys. 7. Schemat synchronizacji węzłowej



Rys. 8. Schemat synchronizacji interwałowej

Manualne wykonanie jednoczesnej synchronizacji kursów w wielu punktach, węzłach synchronizacyjnych sieci komunikacyjnej jest bardzo uciążliwe i czasochłonne, gdyż działania synchronizacyjne w jednym punkcie mogą istotnie pogarszać koordynację w innych węzłach sieci. Efektywnym narzędziem dla planistów rozkładu są automaty generacyjne kursów wg warunków synchronizacyjnych narzuconych w wybranym, jednym węźle sieci.

Synchronizacja rozkładu jazdy w wielu wybranych punktach sieci komunikacyjnej wg zadanych parametrów jest praktycznie możliwa tylko przy wykorzystaniu specjalistycznych algorytmów matematycznej optymalizacji [10,12,13,17,18,19,20].

Optymalizacja systemu

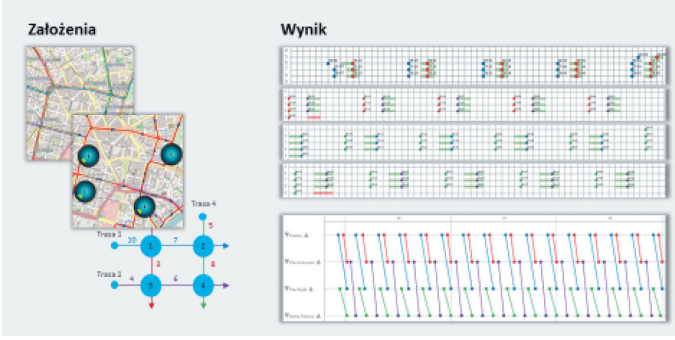
Zastosowanie matematycznej optymalizacji już na etapie planowania strategicznego w zakresie rozkładu przystanków i konstrukcji tras linii komunikacyjnych jest złożonym problemem matematycznym, znajdującym zastosowanie w nielicznych praktycznych projektach i implementacjach softwarowych [1,5,9,12,20,21].

W najnowszych rozwiązaniach [1,2,3,5,7,8] system projektowania rozkładu wyposażony jest w moduły optymalizacyjne kursów, brygad i służb, generujące wymienione obiekty w sposób całkowicie automatyczny z wykorzystaniem algorytmów matematycznej optymalizacji [16,17, 18,20,21,22,23,24,25,26]. Wszystkie wymienione wyżej problemy optymalizacyjne należą do tzw. klasy problemów NP trudnych [27].

Problem optymalizacji kursów rozkładu jazdy jest rozpatrywany jako zagadnienie planowania strategicznego i matematycznie modelowany jest na różne sposoby, jako tzw. zagadnienie QSAP (*Quadratic Semi-Assignment Problem*), MIP (*Mixed Integer Programming*) albo PTSP (*Periodic Time Scheduling Problem*) [10,16,18,19,20,25].

Najczęściej optymalizacja kursów rozkładu jazdy modelowana jest jako zagadnienie synchronizacji kursów w zestawie węzłów z dodatkowymi ograniczeniami. W systemie CLD poszukuje się optymalnego zestawu kursów na podstawie synchronizacji interwałowej i przesiadkowej w dowolnie licznie wybranych punktach synchronizacyjnych sieci, z uwzględnieniem priorytetów (wag) tych punktów, priorytetów linii komunikacyjnych oraz wag dla synchronizacji interwałowej i przesiadkowej.

Stosowane metody optymalizacyjne poszukują minimum funkcji kosztów tworzonego zestawu kursów przy licznych definiowalnych przez użytkownika ograniczeniach. Warunki optymalizacji oraz wyniki w postaci wartości funkcji kosztu, z uwzględnieniem udziału wybranych punktów synchronizacyjnych w jej wartości, są prezentowane w systemie CLD w praktycznej i czytelnej dla projektanta graficznej formie, jak na rysunku 9 dla 4 węzłów synchronizacyjnych sieci komunikacyjnej.



Rys. 9. Przykład optymalizacji rozkładu kursów w systemie CLD

Po zaplanowaniu rozkładu jazdy następuje etap planowania operacyjnego, w którym w kolejności kursy łączone są w brygady tj. zadania dla pojazdów, a te z kolei dzielone na prace kierowców tj. służby. Oba te etapy są niezwykle trudne do planowania manualnego i wspomagane metodami matematycznej optymalizacji, najczęściej z wykorzystaniem programowania liniowego i metod heurystycznych [13,14,16,22,23,24,26]. Te ostatnie praktycznie zastosowano w systemie CLD.

Symulacja planowanego ruchu pojazdów

Zaplanowany rozkład jazdy przed zatwierdzeniem do realizacji powinien być wszechstronnie sprawdzony celem wykrycia nieprawidłowości, takich jak np. niespełnienie wymogów taborowych, zbyt duże obciążenie odcinków sieci, brak przydziału kursów do brygad.

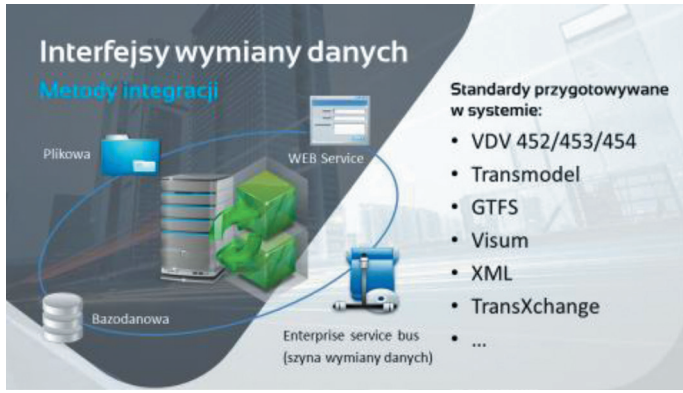
Sprawdzenia reguł rozkładowych powinny być dokonywane na każdym etapie projektowania automatycznie przez system. W systemie CLD użytkownik ma ponadto możliwość symulacji procesu ruchu pojazdów wg rozkładu na sieci z wizualizacją graficzną potencjalnych sytuacji konfliktowych i niepożądanych, co zaprezentowano na rysunku 10.

Rys. 10. Symulacja planowanego ruchu pojazdów na sieci komunikacyjnej

Platforma integracyjna

W przeszłości system planowania rozkładu stanowił wydzielone oprogramowanie, niezależne od innych istotnych dla komunikacji publicznej systemów. Aktualnie istnieje silna interakcja pomiędzy systemem rozkładowym i systemem biletowym, informacją pasażerską, systemem kontroli i sterowania ruchem, systemami zarządzania flotą pojazdów i innymi, co schematycznie zobrazowano na rysunku 11. Oprogramowanie rozkładowe CityLineDesigner zasila pozostałe systemy w dane dotyczące topologii sieci komunikacyjnej, podziału administracyjnego, stref komunikacyjnych, obszaru pokrycia komunikacyjnego [12], rozkładu jazdy i pobiera z tych systemów istotne dane m.in.: zmiany w układzie komunikacyjnym miasta, dane taborowe, dane o potokach pasażerskich, dane o aktualnej sytuacji ruchowej w zakresie realizacji planowych przewozów i obciążenia arterii komunikacyjnych.

Rys.11. Powiązanie systemu projektowania rozkładu jazdy z innymi systemami w transporcie publicznym



Rys. 12. Standardy bazodanowej wymiany danych w transporcie publicznym

Integracja systemowa CLD przebiega na poziomie bazy danych systemu, jest w pełni automatyczna i realizowana z minimalnym opóźnieniem czasowym.

Na rysunku 12 przedstawiono możliwości integracyjne systemów, poczynając od najstarszego rozwiązania opartego na plikowej wymianie danych, po nowoczesne rozwiązania oparte na szynach danych, web serwisach czy też bezpośredniej integracji bazodanowej. Bardzo ważnym elementem systemu jest standaryzacja bazodanowej wymiany danych pochodzących od systemów różnych dostawców. W komunikacji miejskiej w Europie preferowane przez organizację UITP [28] standardy to VDV, Transmodel i TransXchange.

Modelowy projekt integracji bazodanowej systemów transportowych wg powyższych założeń jest realizowany w kilkunastu miastach Polski, między innymi w Miejskich Zakładach Autobusowych w Warszawie.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono istotne wymagania i cechy nowoczesnego systemu projektowania rozkładów jazdy w komunikacji miejskiej. Szczególną uwagę zwrócono na wykorzystanie współczesnych technologii informatycznych, w tym zastosowanie urządzeń mobilnych. Sformułowano ważne wymagania w zakresie bazy danych systemu i powiązania jej z innymi systemami informatycznymi miasta, zwłaszcza w zakresie systemów ITS, informacji pasażerskiej, systemów sterowania i kontroli ruchu. Na przykładach opisano w skrócie etapy procesu konstrukcji rozkładów jazdy. Podkreślono rolę, jaką odgrywają nowoczesne metody matematycznej optymalizacji w procesie projektowania rozkładów jazdy.

Literatura

1. Strona internetowa: www.dpksystem.com
2. Strona internetowa: www.giro.ca
3. Strona internetowa: www.goalsystems.com
4. Strona internetowa: www.initag.com
5. Strona internetowa: www.ivu.com
6. Strona internetowa: www.lumiplan.com
7. Strona internetowa: www.maior.it
8. Strona internetowa: www.trapezegroup.com
9. Ceder A., *Designing public transport network and routes. Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning*, Lam W.H.K., Bell G.H., Emerald Group Publishing Ltd., UK, 2003.
10. Grzyb A., Kisielewski P., *Problemy optymalizacyjne strategicznego planowania transportu pasażerskiego*, XXXII Konferencja Optymalizacja i CAD, Politechnika Koszalińska 2014.
11. Kisielewski P., *Modeling of transport networks with graph theory*, XX Warsztaty Naukowe PTSK, Koszalin-Mielno 2013.
12. Kisielewski P., *Wybrane problemy optymalizacyjne strategicznego planowania w komunikacji miejskiej*, „Logistyka", 2014, nr 6.
13. Kisielewski P., *Logistic Planning in City Public Transit*, 2nd International Conference on „IT Solutions in Logistics", Łomża, Poland 2014.
14. Kisielewski P., *Operational planning in city public transit,* XXI Warsztaty Naukowe PTSK, Białystok-Białowieża 2014.
15. Kisielewski P., Ulman B., *Projektowanie sieci komunikacji miejskiej w oparciu o kompleksowe badania ruchu*, „Logistyka", 2015, nr 3.
16. Lam W., Bell M., *Advanced modeling for transit operations and service planning*, Pergamon 2003.
17. Ceder A, Tal O., *Timetable synchronization for buses, Computer-Aided Transit Scheduling*, Proceedings of the Seventh International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, Cambridge, MA, USA,1997.
18. Eranki A., *A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops*, Graduate School Theses and Dissertations. University of South Florida, 2004.
19. Klemt W.D., Stemme W., *Schedule Synchronization for Public Transit Networks*, Daduna J.R.,Wren A., Computer-Aided Transit Scheduling, Springer-Verlag Berlin-Heildelberg, 1988.
20. Quak C.B., *A passenger-oriented approach of the construction of a global linen network and an efficient timetable*, Delft University of Technology, 2003
21. Ceder A., *Operational objective functions in designing public transport routes*, Journal of Advanced Transportation, Vol. 35, No. 2, 2001.
22. Ahuja R., Mohring R., Zaroliagis C., *Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation Systems*, Springer-Verlag, Berlin 2009.
23. Kisielewski P., *Planning and dispatching optimization of city transport*, Konferencja IGKM, Białystok 2012.
24. Kisielewski P., *City transit logistics system with optimization module*, XXX Konferencja Polioptymalizacja i CAD, Politechnika Koszalińska, Mielno 2012.
25. Liebchen C., *Periodic Timetable Optimization in Public Transport*, Technische Universitat, Disertations, Berlin 2006.
26. Wilson N., Nuzzolo A., *Schedule-Based Dynamic Transit Modeling: Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers 2010.
27. Simchi-Levi D., Chen X., Bramel J., *The Logic of Logistics*, Springer, 2014.
28. Strona internetowa: www.uitp.org

MARIUSZ KIEĆ
dr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 12 6282158, e-mail: mkiec@pk.edu.pl
SYLWIA POGODZIŃSKA
mgr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 12 6282158, e-mail: spogodzinska@pk.edu.pl

Ocena stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego na drogach wchodzących w skład ISSRRP[1]

Streszczenie: W artykule przedstawiono ocenę bezpieczeństwa ruchu drogowego dla dróg wchodzących w skład systemu obszarowego sterowania ruchem, na przykładzie Inteligentnego Systemu Sterowania Ruchem Regionu Podhalańskiego (ISSRRP). Ocena brd została przeprowadzona za pomocą metody ilorazu szans („odds ratio"). Wykorzystując dane o zdarzeniach drogowych z lat 2009–2014, oszacowano zmianę stanu bezpieczeństwa ruchu oddzielnie dla dróg wojewódzkich i krajowych wchodzących w skład systemu sterowania oraz dla całego systemu. Przedstawiono również zmianę rodzaju i przyczyn wypadków na drogach objętych systemem sterowania ruchem. Miernikami kwantyfikującymi stan bezpieczeństwa ruchu były: liczby wypadków, rannych i ofiar śmiertelnych oraz wskaźniki wypadkowe (gęstości wypadków, względnego wskaźnika wypadkowego i wskaźnika zagrożenia). Wykazano negatywny wpływ, w okresie po wprowadzeniu ISSRRP, na bezpieczeństwo ruchu głównie dla dróg krajowych wchodzących w skład systemu w odniesieniu do grupy referencyjnej, składającej się z wybranych dróg krajowych w Małopolsce.

Słowa kluczowe: bezpieczeństwo ruchu drogowego, ISSRRP, sterowanie ruchem, iloraz szans, ITS, wypadek

Wprowadzenie

Z roku na rok liczba pojazdów zarejestrowanych w Polsce rośnie. Na przestrzeni ostatnich pięciu lat (2009–2014) wzrost ten wyniósł około 20,2% [1]. Postępujący rozwój motoryzacji, wynikający z rosnącego popytu na podróże, przyczynia się do wzrostu zatłoczenia w sieci drogowo-ulicznej. Prowadzi to w konsekwencji do zwiększenia strat czasu pojazdów, zmniejszenia poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego, wzrostu zużycia paliwa i uciążliwości ruchu dla środowiska, pogorszenia stanu nawierzchni itd. Rozbudowa układu drogowo-ulicznego nie zawsze jest dobrym rozwiązaniem. Wynika to z ograniczeń terenowych (występujących zwłaszcza na terenie zabudowanym) oraz chęci ochrony niektórych terenów przed nadmiernym ruchem (np. centra miast, obszary mieszkaniowe, rekreacyjne). Ponadto rozbudowa sieci drogowo-ulicznej to proces bardzo kosztowny i rozległy w czasie, a efekty, które ze sobą niesie, mogą być krótkotrwałe. Od lat prowadzone są prace mające na celu rozwój metod pozwalających na dynamiczne sterowanie ruchem w sieciach drogowych z wykorzystaniem nowoczesnych narzędzi ITS również na drogach zamiejskich, głównie szybkiego ruchu. Przykładem Inteligentnych Systemów Transportowych są systemy informujące kierujących pojazdami o zatłoczeniach na drodze za pomocą znaków zmiennej treści bądź kanałów informacji takich jak Internet, GSM, GPS.

Jednym z newralgicznych obszarów zamiejskich w Polsce, który charakteryzuje się znacznymi okresowymi przeciążeniami ruchu, jest region podhalański, obejmujący połączenie drogowe Krakowa i Zakopanego. Na początku 2012 roku uruchomiony został Inteligentny System Sterowania Ruchem Regionu Podhalańskiego (ISSRRP) obejmujący swoim zasięgiem sieć dróg krajowych, wojewódzkich oraz powiatowych przebiegających przez obszar Podhala [2]. Wprowadzenie systemu miało na celu poprawę warunków ruchu w okresach przeciążenia sieci drogowej na odcinku Zakopane–Kraków poprzez zmianę rozkładu natężenia. Zmiana ruchu w sieci drogowej może przyczyniać się do zmiany warunków ruchu, jak również poziomu bezpieczeństwa ruchu drogowego. Celem artykułu jest ocena bezpieczeństwa ruchu drogowego na drogach wojewódzkich i krajowych (objętych działaniem ISSRRP) w okresie po wprowadzeniu systemu obszarowego sterowania ruchem, co pozwoli oszacować jego wpływ na brd. Ocena przeprowadzona została również w odniesieniu do rodzajów i przyczyn występowania wypadków drogowych w regionie podhalańskim. Analizę przeprowadzono w oparciu o relatywne miary zmiany liczby wypadków, rannych i ofiar śmiertelnych oraz wskaźników wypadkowych na sieci dróg krajowych i wojewódzkich objętych systemem ISSRRP, wyznaczone w okresie trzech lat po oddaniu systemu do użytkowania.

Opis systemów obszarowych sterowania ruchem i ich wpływu na bezpieczeństwo ruchu

Głównym celem rozkładu ruchu w sieci z wykorzystaniem systemów ITS jest efektywne wykorzystanie rezerw przepustowości tkwiących w układzie drogowym. W związku z powyższym podstawowym zadaniem systemu obszarowego sterowania ruchem jest wskazywanie kierowcom alternatywnych tras charakteryzujących się wyższym komfortem jazdy i krótszym czasem przejazdu. W przypadku systemu ISSRRP informacje o czasach przejazdu poszczególnymi odcinkami ustalane są na podstawie rzeczywistych czasów podróży analizowanymi trasami. Dane te są następnie wyświetlane na tablicach zmiennej treści (VMS) umieszczonych przy drodze, udostępniane w Internecie oraz za pomocą bezpłatnej aplikacji do nawigacji GPS możliwej do pobrania na telefon komórkowy. Za granicą rozwijane są

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: M. Kieć – 50%, S. Pogodzińska – 50%

również systemy, w których informacje o czasach przejazdu poszczególnymi trasami są przekazywane kierowcom poprzez specjalne urządzenia zamontowane w pojeździe.

Funkcjonowanie systemu obszarowego sterowania ruchem, oprócz poprawy warunków ruchu, może mieć wpływ na brd i, jak wskazują badania zagraniczne, wpływ ten jest niejednoznaczny [3]. Gdy część potoku pojazdów kierowana jest na trasę alternatywną, natężenie ruchu na drodze głównej ulega redukcji. Mniejsze natężenie ruchu jest równoznaczne z większą swobodą wyboru prędkości i manewrowania, a tym samym z wyższym komfortem podróżowania i mniejszym prawdopodobieństwem wystąpienia zdarzenia drogowego. Należy jednak zaznaczyć, że na drogach alternatywnych, na których natężenie ruchu pojazdów wzrasta, efekt stosowania systemu jest odwrotny (tj. mniejsza swoboda manewrowania i wyboru prędkości, niższy komfort jazdy, większe prawdopodobieństwo wystąpienia zdarzenia drogowego). Ponadto drogi alternatywne często charakteryzują się niższym standardem technicznym niż trasy główne. Istnieje wówczas zagrożenie, że nie będą one przygotowane do obsługi większego potoku pojazdów. Funkcjonowanie systemu obszarowego sterowania ruchem może również wpływać na zmianę rozkładu kierunkowego w przekroju i struktury kierunkowej ruchu na skrzyżowaniach, co w konsekwencji prowadzić może do zwiększenia liczby wypadków powodowanych manewrami na skrzyżowaniach.

Innym niekorzystnym efektem wprowadzenia systemów sterowania ruchem może być rozproszenie i odwrócenie uwagi kierujących od sytuacji na drodze w miejscach umieszczenia tablic VMS ([3], [4]). Użytkownicy skupiający się na informacjach wyświetlanych na tablicach mogą popełniać więcej błędów, a tym samym przyczyniać się do zwiększenia liczby sytuacji konfliktowych. Podczas zbliżania się do tablic VMS znaczna część kierowców redukuje prędkość przejazdu m.in. w celu: wydłużenia czasu obserwacji treści wyświetlanych na tablicach VMS, czy zahamowania za pojazdem poprzedzającym [5], co powoduje wzrost dyspersji prędkości. Częstsze hamowania i zmiany pasów ruchu oraz poszukiwanie możliwych wyjazdów z drogi wpływa na wzrost zagrożenia wypadkami ([6], [7]).

System obszarowego sterowania ruchem częściej spotyka się w miastach niż na drogach zamiejskich. System taki funkcjonuje m.in. w norweskim mieście Trondheim. Badania ankietowe prowadzone wśród tamtejszych kierowców potwierdziły negatywne oddziaływanie tablic VMS na poziom koncentracji kierowców. Niemal 10% badanych zgodziło się, że są rozpraszani przez treści wyświetlane na tablicach, niektórzy mieli trudności z ich odczytaniem [8].

Efekt dynamicznego wskazywania trasy poprzez informacje przesyłane do urządzenia zamontowanego w pojeździe był wielokrotnie badany. Jedne z analiz przeprowadzanych dla Londynu [9] wykazały wzrost liczby zdarzeń drogowych w powiązaniu ze wzrostem udziału pojazdów wyposażonych w urządzenia pokładowe. Zakładając, że udział ten wynosi 100%, koszty zdarzeń drogowych wzrastają o 1,5%. Przyjmując, że z urządzeń pokładowych korzysta 30%, 20% i 10% wszystkich kierowców, koszty te są mniejsze. Opisany powyżej wzrost liczby zdarzeń wynika z faktu, że w celu skrócenia czasu podróży kierowcy często zmieniają trasę przejazdu. Zwiększa się tym samym liczba wykonywanych manewrów oraz aktywność pojazdów w sieci, co prowadzi do wzrostu prawdopodobieństwa wystąpienia zdarzenia drogowego. Badania [10] sugerują, że rozkład ruchu w sieci miejskiej zapewniający najkrótszy czas przejazdu prowadził do wzrostu liczby wypadków. Można to tłumaczyć tym, że czas podróży jest minimalizowany, gdy ruch rozkładany jest równomiernie w całej sieci, w związku z czym żaden odcinek nie jest obciążony bardziej od innych. Taki model rozkładu ruchu generuje wiele sytuacji konfliktowych na skrzyżowaniach, a tym samym prowadzi do wzrostu liczby zdarzeń drogowych [11]. Należy zwrócić uwagę, że prowadzone badania efektywności systemów pod względem bezpieczeństwa ruchu opisują systemy stosowane na drogach miejskich.

Metoda analiz bezpieczeństwa ruchu dla ISSRRP

Do oceny zmian stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego zastosowano metodę ilorazu szans (*odds ratio OR*) [12], która określa stosunek szansy wystąpienia danego zdarzenia (w danej grupie) do wystąpienia tego samego zdarzenia w innej grupie porównywanej (kontrolnej). Za pomocą wskaźnika *OR* można określić, o ile większa ($OR>1$) bądź mniejsza ($OR<1$) jest szansa wystąpienia danego zdarzenia. Wartość zbliżona do wartości 1 oznacza brak wpływu analizowanego czynnika (wprowadzonej zmiany) na szansę wystąpienia danego zdarzenia.

$$OR = \frac{A/B}{C/D} \quad [-] \qquad (1)$$

gdzie:

A – liczba zdarzeń w analizowanej grupie po wprowadzeniu zmian

B – liczba zdarzeń w analizowanej grupie przed wprowadzeniem zmian

C – liczba zdarzeń w grupie kontrolnej po wprowadzeniu zmian

D – liczba zdarzeń w grupie kontrolnej przed wprowadzeniem zmian.

Dodatkowo w celu oceny statystycznej istotności oszacowanego wpływu wyznaczono przedziały ufności z prawdopodobieństwem 95%. Przedział ufności dla szacowanego wpływu wyznacza się z następującego wzoru:

$$PU = exp\left(ln(OR) \pm SEln(OR)\right) \quad [-] \qquad (2)$$

gdzie:

ln(OR) – logarytm naturalny z oszacowanego wpływu (ilorazu szans)

SEln(OR) – błąd standardowy logarytmu ilorazu szans wyznaczony wg wzoru:

$$SEln(OR) = \sqrt{\frac{1}{A}+\frac{1}{B}+\frac{1}{C}+\frac{1}{D}} \quad [-] \qquad (3)$$

Zastosowana metoda pozwala w sposób uproszczony oszacować stan bezpieczeństwa ruchu drogowego, z pominięciem istotnych ograniczeń oceny wymaganej w przypadku stosowania regresyjnych modeli wypadkowych.

Zmianę poziomu bezpieczeństwa ruchu na analizowanych odcinkach określono na podstawie miar bezwzględnych tj. liczby wypadków, ofiar śmiertelnych i rannych dla ogółu wypadków (w grupach przyczyn i rodzajów zdarzeń), jak również miar względnych [13]:

- wskaźnika gęstości wypadków, będącego ilorazem liczby wypadków i całkowitej długości dróg w sieci, który określa średnią liczbę wypadków jaka przypada na odcinek drogi o jednostkowej długości.

$$D_w = \frac{\sum W_i}{\sum L_i} \quad [\text{wyp/km}] \qquad (4)$$

gdzie:

SW_i – sumaryczna liczba wypadków dla analizowanego odcinka

ΣL_i – całkowita długość analizowanego odcinka [km];

- względnego wskaźnika wypadkowego, który wiąże liczbę wypadków zarejestrowanych na danym odcinku drogowym z pracą przewozową.

$$U_w = \frac{\sum W_i * 10^6}{T * 365 * \sum Q_i * L_i} \quad [\text{wyp/mln pojem/rok}] \qquad (5)$$

gdzie:

Q_i – średniodobowe natężenie ruchu w roku dla danego odcinka [P/dobę]

L_i – długość odcinka [km]

T – okres analizy [lata],

W_i – liczba wypadków na odcinku o długości L_i i natężeniu Q_i;

- wskaźnika zagrożenia, równego średniej geometrycznej wskaźnika gęstości wypadków i względnego wskaźnika wypadkowego:

$$W_z = \sqrt{D_w * U_w} \quad [-] \qquad (6)$$

gdzie:

D_w – wskaźnik gęstości wypadków dla danego odcinka [wyp/km]

U_w – względny wskaźnik wypadkowy dla danego odcinka [wyp/mln pojkm/rok].

Ocena bezpieczeństwa ruchu dla ISSRRP

Ocenę wpływu wprowadzenia ISSRRP na bezpieczeństwo ruchu przeprowadzono na podstawie obserwowanej liczby: wypadków, rannych i ofiar śmiertelnych w okresie „przed" i „po" uruchomieniu systemu. Analiza polegała na wyznaczeniu zmiany poszczególnych miar brd na drogach objętych systemem ISSRRP w okresie trzech lat po wprowadzeniu systemu (tj. lata 2012–2014) w stosunku do trzyletniego okresu przed (tj. lata 2009–2011) i porównaniu tych zmian ze zmianami dla dróg grupy kontrolnej w tym samym okresie czasu.

W analizach bezpieczeństwa ruchu, przeprowadzonych przez autorów, jako drogi objęte systemem sterowania należy rozumieć odcinki dróg krajowych (DK) i wojewódzkich (DW) przedstawione na rysunku 1, tj.:

- DK 7 Chabówka–Jabłonka,
- DK 47 Chabówka–Zakopane,
- DK 49 Nowy Targ–Czarna Góra,
- DW 957 Jabłonka–Nowy Targ,
- DW 958 Chabówka–Zakopane,
- DW 960 Bukowina Tatrzańska–Brzegi,
- DW 961 Poronin–Bukowina Tatrzańska.

Na drogach tych natężenie ruchu pojazdów może się zmieniać w zależności od funkcjonowania systemu i informacji wyświetlanych na znakach VMS.

Grupę kontrolną stanowiły odcinki dróg krajowych jednojezdniowych i wojewódzkich w granicach województwa małopolskiego, położone na południe od miasta Kraków (z wyłączeniem odcinków objętych systemem sterowania). Takie założenie jest uzasadnione rozwiązaniem geometrycznym dróg w regionie podhalańskim, które charakteryzują się większą krętością i pochyleniami podłużnymi niż odcinki zlokalizowane w części północnej województwa małopolskiego.

Analizą objęto w sumie 177,17 km dróg wchodzących w skład ISSRRP (w tym 94,47 km dróg wojewódzkich i 82,70 km dróg krajowych) oraz 1591,98 km dróg grupy kontrolnej (w tym 1046,58 km dróg wojewódzkich i 545,40 km dróg krajowych). Z analiz wyłączone zostały drogi powiatowe wchodzące w skład ISSRRP. Powodem były trudności z oszacowaniem na nich zmienności ruchu oraz lokalizacji zdarzeń drogowych. Ponadto istotna zmiana natężenia ruchu pojazdów może wystąpić tylko na jednej drodze powiatowej tj. drodze nr 1648K Zakopane–Wierch Poroniec.

Rys. 1. Sieć dróg krajowych i wojewódzkich uwzględniona w analizach
Źródło: opracowanie własne na podstawie www.google.pl/maps

Zmianę stanu bezpieczeństwa ruchu drogowego opisaną ilorazem szans wyznaczono zgodnie ze wzorem 1 zarówno dla miar bezpośrednich tj. liczby wypadków (W), rannych (R) i ofiar śmiertelnych (Z), jak i dla względnego wskaźnika wypadkowego (U_W) i wskaźnika zagrożenia (W_Z). Iloraz szans dla oceny brd w obszarze objętym ISSRRP przyjmuje następującą ogólną postać:

$$OR = \frac{system\ "po"/system\ "przed"}{sieć\ "po"/sieć\ "przed"}$$

gdzie:

system „po” – liczba zdarzeń drogowych/wskaźnik wypadkowy w okresie po oddaniu systemu ISSRRP do eksploatacji (tj. w latach 2012–2014) dla analizowanych dróg objętych systemem sterowania

system „przed” – liczba zdarzeń drogowych/wskaźnik wypadkowy w okresie przed oddaniem systemu ISSRRP do eksploatacji (tj. w latach 2009–2011) dla analizowanych dróg objętych systemem sterowania

sieć „po” – liczba zdarzeń drogowych/wskaźnik wypadkowy w okresie po oddaniu systemu ISSRRP do eksploatacji (tj. w latach 2012–2014) dla odcinków referencyjnych (grupa kontrolna)

sieć „przed” – liczba zdarzeń drogowych/wskaźnik wypadkowy w okresie przed oddaniem systemu ISSRRP do eksploatacji (tj. w latach 2009–2011) dla odcinków referencyjnych (grupa kontrolna).

W okresie trzech lat przed oddaniem ISSRRP do eksploatacji zarejestrowano 361 wypadków na analizowanych drogach objętych systemem (w tym 150 na DW i 211 na DK) i 2831 wypadków w grupie kontrolnej (w tym 1461 na DW i 1370 na DK). W latach 2012–2014 liczba ta wynosiła odpowiednio 360 (w tym 124 na DW i 236 na DK) i 2269 (w tym 1230 na DW i 1039 na DK).

Wszystkie odcinki uwzględnione w analizie podzielono na odcinki referencyjne. Dla dróg wojewódzkich odcinki referencyjne przyjęto zgodnie z ewidencją prowadzoną przez zarząd dróg. W przypadku dróg krajowych założono, że odcinki referencyjne to odcinki o stałym średniodobowym natężeniu ruchu pojazdów ustalonym w trakcie Generalnego Pomiaru Ruchu z roku 2010. Dane wypadkowe zostały pozyskane z Systemu Ewidencji Wypadków i Kolizji (SEWiK), a średniodobowe natężenia ruchu pojazdów w kolejnych latach, niezbędne do obliczenia względnego wskaźnika wypadkowego, obliczono na podstawie danych z GPR 2005 i GPR 2010 przy zastosowaniu metody wskaźnikowej opracowanej przez Generalną Dyrekcję Dróg Krajowych i Autostrad (GDDKiA) [14].

Miary względne brd obliczono osobno dla każdego odcinka referencyjnego z wyróżnieniem okresu „przed” i „po” uruchomieniu ISSRRP. Względny wskaźnik wypadkowy jest zależny od średniodobowego natężenia ruchu pojazdów i przyjmuje różne wartości w kolejnych latach oraz dla poszczególnych odcinków. Zatem wyznaczając wartość tego wskaźnika dla danego odcinka referencyjnego „przed” wdrożeniem ISSRRP, jako liczbę zdarzeń drogowych przyjęto sumaryczną liczbę zdarzeń z okresu 3 lat (2009–2011), a za średniodobowe natężenie ruchu pojazdów – średnią arytmetyczną natężeń z okresu 2009–2011. Analogicznie obliczono wartość względnego wskaźnika wypadkowego dla okresu „po”.

W tabeli 1 przedstawione zostały wyniki oszacowania wpływu wdrożenia ISSRRP na zmianę bezpieczeństwa ruchu drogowego wyznaczone za pomocą wartości ilorazów szans wraz z zakresem przedziałów ufności dla prawdopodobieństwa 95%. Statystycznie istotne wyniki uzyskano wyłącznie dla liczby wypadków i rannych w przypadku dróg krajowych. Analiza wskazuje, że liczba wypadków i rannych na analizowanych drogach krajowych wchodzących w skład ISSRRP jest większa odpowiednio o około 47% i 42% w stosunku do dróg grupy referencyjnej, co wskazuje na istotne pogorszenie stanu brd na drogach objętych analizą. W pozostałych przypadkach dla dróg krajowych wartość *OR* wynosiła powyżej 1, jednakże zakres przedziału ufności (przyjmujący wartości poniżej i powyżej 1) nie pozwala na jednoznaczną ocenę efektu. W przypadku dróg wojewódzkich wchodzących w skład ISSRRP wszystkie miary okazały się być statystycznie nieistotne, a wartość OR wyniosła około 1 (z wyjątkiem liczby ofiar śmiertelnych).

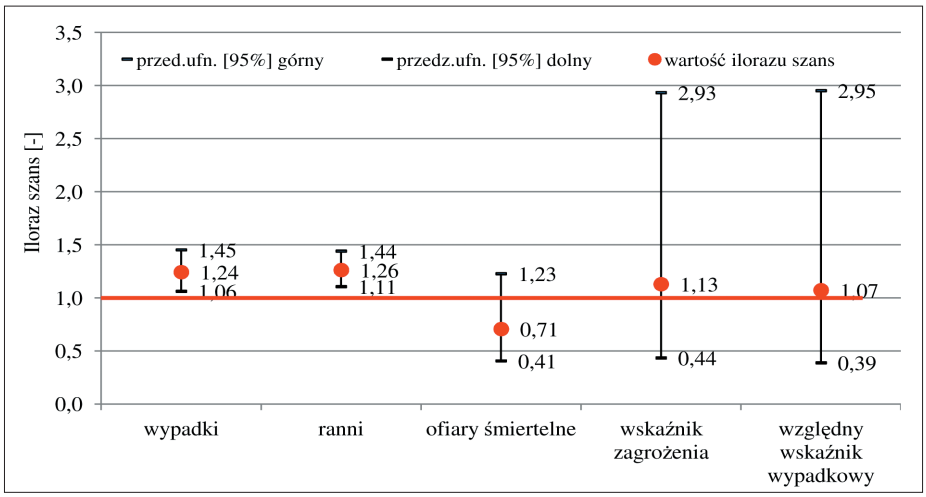
Tabela 1

Iloraz szans dla miar bezpośrednich i pośrednich na drogach wojewódzkich i krajowych

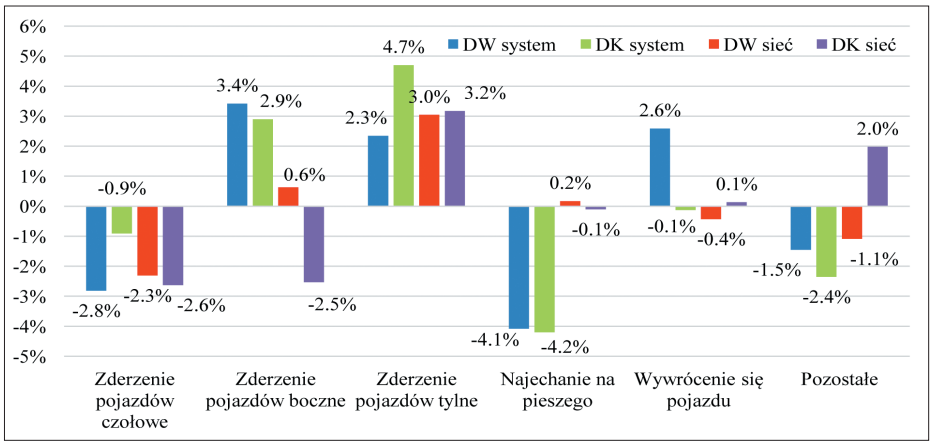
Miara bezpieczeństwa ruchu	Drogi krajowe			Drogi wojewódzkie		
	PU dolny	OR	PU górny	PU dolny	OR	PU górny
Liczba wypadków	1,20	**1,47**	1,81	0,76	**0,98**	1,26
Liczba rannych	1,20	**1,42**	1,68	0,87	**1,08**	1,68
Liczba ofiar śmiertelnych	0,53	**1,01**	1,93	0,10	**0,33**	1,03
Względny wskaźnik wypadkowy	0,18	**1,30**	9,62	0,29	**0,95**	3,13
Wskaźnik zagrożenia	0,33	**1,30**	5,03	0,26	**0,99**	3,82

Podobne wyniki jak dla dróg krajowych uzyskano w przypadku oceny sumarycznego efektu dla wszystkich dróg funkcjonujących w systemie ISSRRP (tj. krajowych i wojewódzkich, rys. 2). Analiza wskazuje na statystycznie istotny wzrost liczby wypadków i rannych wynoszący około 25% względem grupy kontrolnej. Wpływ na taki wynik ma głównie pogorszenie się stanu brd na drogach krajowych wchodzących w skład systemu. Iloraz szans dla wskaźników wypadkowych (uwzględniający w sposób szacunkowy wpływ natężenia ruchu) również wskazuje na wzrost względem grupy kontrolnej o około 10%, jednakże ze względu na nadmierny rozstęp przedziału ufności efekt ten jest statystycznie nieistotny.

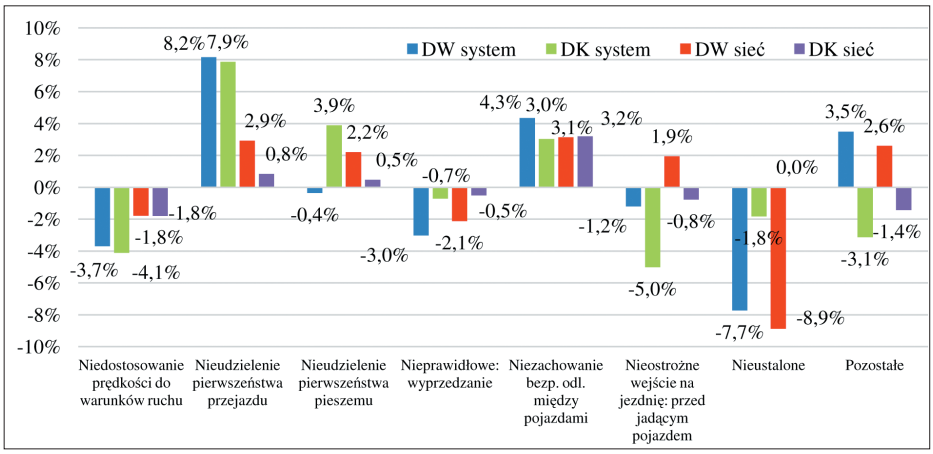
Zgodnie z doświadczeniami zagranicznymi, dla systemów obszarowego sterowania ruchem należy spodziewać się zmian w strukturze wypadków. Dlatego w kolejnym kroku analiz oceniono bezwzględną zmianę udziału procentowego wybranych rodzajów i przyczyn wypadków dla okresu



Rys. 2.
Ocena stanu bezpieczeństwa ruchu w systemie ISSRRP



Rys. 3. Zmiana udziału procentowego rodzaju wypadków w analizowanej sieci dróg po wprowadzeniu ISSRRP



Rys. 4. Zmiana udziału procentowego przyczyn wypadków w analizowanej sieci dróg po wprowadzeniu ISSRRP

„przed" i „po" wprowadzeniu ISSRRP dla dróg wojewódzkich i krajowych. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono te przyczyny i rodzaje wypadków, które występują najczęściej (pozostałe przyczyny i rodzaje zostały zebrane w jednej grupie).

Analiza wskazuje na redukcję udziału zderzeń czołowych oraz wzrost zderzeń bocznych (z wyjątkiem grupy kontrolnej dla dróg krajowych) i tylnych w całkowitej liczbie wypadków po wprowadzeniu ISSRRP w stosunku do okresu „przed". Szczególnie dużą zmianę zaobserwowano w przypadku zderzeń tylnych. Zmiana udziału zderzeń tylnych i czołowych we wszystkich analizowanych grupach wskazuje na ogólną tendencję w zmianie struktury wypadków, co może być związane ze wzrostem natężenia ruchu.

Efektem występowania wzrostu udziału zderzeń tylnych i bocznych jest równoczesny wzrost udziału wypadków związanych z niezachowaniem bezpiecznej odległości między pojazdami i nieudzieleniem pierwszeństwa przejazdu. Równocześnie nastąpiła redukcja wypadków związanych z nadmierną prędkością. Wyniki te mogą potwierdzać tezę o wzroście liczby wypadków związanych z manewrami na skrzyżowaniach oraz zwiększeniem ekspozycji na ryzyko.

W celu oceny statystycznej zmiany rodzajów i przyczyn wypadków wyznaczono wartości ilorazów szans rodzajów i przyczyn wypadków wraz z przedziałami ufności dla liczby wypadków (W), rannych (R) i ofiar śmiertelnych (Z) (tabela 2 i 3). Wyniki statystycznie istotne zaznaczono kolorem

Tabela 2

Iloraz szans rodzajów wypadków na drogach wojewódzkich i krajowych ISSRRP

Rodzaj zdarzenia PU dolny		Drogi krajowe			Drogi wojewódzkie		
		PU dolny	OR	PU górny	PU dolny	OR	PU górny
Zderzenie pojazdów czołowe	W	1,00	**1,67**	2,78	0,50	**0,94**	1,76
	R	1,01	**1,46**	2,09	0,71	**1,12**	1,79
	Z	0,60	**2,21**	8,19	0,02	**0,22**	1,90
Zderzenie pojazdów boczne	W	1,22	**1,82**	2,71	0,67	**1,09**	1,79
	R	0,95	**1,31**	1,80	0,81	**1,22**	1,85
	Z	0,14	**0,84**	4,97	-	-	-
Zderzenie pojazdów tylne	W	0,98	**1,60**	2,59	0,41	**0,96**	2,26
	R	1,06	**1,60**	2,40	0,52	**1,17**	2,59
Najechanie na pieszego	W	0,79	**1,22**	1,89	0,50	**0,83**	1,37
	R	0,85	**1,35**	2,15	0,51	**0,84**	1,38
	Z	0,41	**1,15**	3,17	0,11	**0,83**	6,08
Wywrócenie się pojazdu	W	0,60	**1,42**	3,37	0,58	**1,60**	4,44
	R	1,03	**2,19**	4,68	0,42	**0,92**	2,01
Pozostałe	W	0,61	**1,07**	1,86	0,55	**0,99**	1,77
	R	0,77	**1,24**	2,00	0,70	**1,12**	1,81
	Z	0,02	**0,25**	2,64	-	-	-

Tabela 3

Iloraz szans przyczyn wypadków na drogach wojewódzkich i krajowych ISSRRP

Przyczyna zdarzenia PU dolny		Drogi krajowe			Drogi wojewódzkie		
		PU dolny	OR	PU górny	PU dolny	OR	PU górny
Niedostosowanie prędkości do warunków ruchu	W	0,83	**1,29**	2,01	0,53	**0,90**	1,52
	R	0,73	**1,03**	1,46	0,80	**1,19**	1,78
	Z	0,13	**0,70**	3,84	0,07	**0,83**	9,69
Nieudzielenie pierwszeństwa przejazdu	W	1,34	**2,21**	3,62	0,71	**1,35**	2,55
	R	0,87	**1,29**	1,91	0,82	**1,42**	2,45
	Z	0,03	**0,18**	1,11	-	-	-
Nieudzielenie pierwszeństwa pieszemu	W	1,16	**2,97**	7,59	0,20	**0,57**	1,62
	R	1,31	**3,19**	7,80	0,19	**0,54**	1,51
Nieprawidłowe wyprzedzanie	W	0,64	**1,43**	3,22	0,34	**0,90**	2,37
	R	0,55	**1,15**	2,40	0,24	**0,59**	1,45
	Z	0,29	**3,27**	36,31	-	-	-
Niezachowanie bezp. odl. między pojazdami	W	0,83	**1,46**	2,58	0,39	**1,01**	2,62
	R	1,13	**1,84**	3,00	0,43	**0,98**	2,25
Nieostrożne wejście na jezdnię przed jadącym pojazdem	W	0,45	**0,93**	1,92	0,02	**0,18**	1,84
	R	0,37	**0,84**	1,94	0,02	**0,19**	1,99
	Z	0,30	**1,24**	5,11	-	-	-
Nieustalone	W	0,32	**0,96**	2,84	0,56	**0,99**	1,72
	R	0,39	**1,06**	2,86	0,50	**0,88**	1,52
	Z	0,19	**2,18**	25,02	0,19	**0,90**	4,23
Pozostałe	W	0,91	**1,37**	2,08	0,58	**1,03**	1,84
	R	1,34	**1,88**	2,65	0,72	**1,15**	1,84
	Z	0,14	**0,75**	4,09	-	-	-

żółtym. Występują one wyłącznie w przypadku dróg krajowych i wskazują na wzrost analizowanych efektów względem grupy kontrolnej. Dla dróg wojewódzkich oszacowane efekty zmian są nieistotne statystycznie. W takim przypadku przedstawione wartości ilorazu szans (*OR*) należy traktować jako niejednoznaczne. W przypadku ofiar śmiertelnych wnioskowanie na ich temat ze względu na małe zbiory jest utrudnione.

Wyniki wskazują na istotny wzrost zderzeń czołowych (dla wypadków i rannych), bocznych (wypadki), tylnych (rannych) oraz wywróceń pojazdów (ranni) na drogach krajowych względem grupy kontrolnej.

Podsumowanie

Przedstawione badania wskazują na negatywną, istotną statystycznie, zmianę stanu bezpieczeństwa ruchu na drogach ISSRRP. Powodowane jest to przede wszystkim znacznym wzrostem liczby wypadków i rannych na drogach krajowych względem odcinków referencyjnych (OR>1). W przypadku dróg wojewódzkich wpływ ten jest niejednoznaczny. Wykazano nieznaczną poprawę stanu bezpieczeństwa ruchu (OR<1) na drogach wchodzących w skład systemu względem grupy kontrolnej, jednakże wpływ ten nie jest istotny statystycznie.

Przeprowadzona ocena ma charakter ogólny i wymaga dalszych analiz. Nie uwzględniono w nich szeregu czynników mogących mieć bezpośredni wpływ na brd, m.in. zagospodarowanie otoczenia drogi, parametry geometryczne i wyposażenie przekroju poprzecznego, wielkości natężenia poprzecznych potoków ruchu. Dalsze analizy powinny być ukierunkowane na zastosowanie regresyjnych modeli wypadkowych, które pozwoliłyby z większą dokładnością wskazać, które czynniki infrastrukturalne i w jakim stopniu decydują o zmianie stanu brd na sieci dróg wchodzących w skład ISSRRP.

Literatura

1. GUS, Departament Handlu i Usług: *Transport. Wyniki działalności w 2014 r*. Warszawa 2015.
2. Kieć M., Pogodzińska S., *Ocena wpływu obszarowego sterowania ruchem na sieci dróg zamiejskich na bezpieczeństwo ruchu*, „Logistyka", 2015 nr 3.
3. Vaa T., Gelau C., Penttinen M., Spyroupolou I. *ITS and effects on road traffic accidents – State of the art*. Paper presented at the 13th World Congress on ITS, London 2006.
4. Rothengatter T., Carbonell-Vaya E., de Ward D., Brookhuis K.A., *On the measurement of driver mental workload.* In J.A. Rothengatter & E. Carbonell Vaya (Eds.), Traffic and Transport Psychology. Theory and application (161–171). Oxford: Pergamon, 1997.
5. Erke A., Sagberg F., *Effects of Variable Message Signs (VMS) on driver attention and behaviour*, Association for European Transport, 2006.
6. Erke A., Sagberg F., Hagman, R., *Effects of route guidance variable message signs (VMS) on driver behaviour*. Transportation Research Part F, 10, 447–457, Elsevier, 2007.
7. Erke H., Gottlieb W., *Psychologische Untersuchung der Wirksamkeit von Wechselverkehrszeichenanlagen,* Verfahren fur die zentrale Dokumentation der wegweisenden Beschilderung an Autobahnen. Heft 289. Forschung Strassenbau und Strassenverkehrstechnik. Bundesminister für Verkehr, Abteilung Strassenbau, Bonn-Bad Godesberg, 1980.
8. Høye A., Sørensen M., Elvik R., Akhtar J., Nævestad T., Vaa T., *Evaluation of variable message signs in Trondheim*, TØI Report, Oslo, Norway, 1153/2011, 2011.
9. Stoneman B., *The effects of dynamic route guidance in London*. Research Report 348. Transport Research Laboratory, Crowthorne, Berkshire, 1992.
10. Maher M. J., Hughes P. C., Smith M. J., Ghali M. O., *Accident and Travel Time-Minimising Routeing Patterns in Congested Networks*. Traffic Engineering and Control, 34, 414–419, 1993.
11. Abdulhai B., Look H., *Safety benefits of dynamic route guidance: boon or boondoggle?*, Intelligent Transportation Systems,. Proceedings. The IEEE 5th International Conference on Intelligent Transportation Systems, 2002.
12. Elvik R., Høye A., Vaa T., Sørensen M., *The handbook of road safety measures. Second edition*, Emerald Group Publishing, 2009.
13. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKŁ, Warszawa 2011.
14. http://www.gddkia.gov.pl/pl/992/zalozenia-do-prognoz-ruchu

MIROSŁAW CZERLIŃSKI
inż., Studenckie Koło Naukowe Inżynierii Ruchu Drogowego, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska
RAFAŁ RUŚĆ
inż., Studenckie Koło Naukowe Inżynierii Ruchu Drogowego, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska
JÓZEF SUDA
dr inż., opiekun Studenckiego Koła Naukowego Inżynierii Ruchu Drogowego, Wydział Transportu, Politechnika Warszawska

Ocena efektywności działania priorytetów dla tramwajów realizowanych w systemie SPRINT/ITS/SCATS za pomocą narzędzia VISSIM[1]

Streszczenie: W artykule przedstawiono ocenę efektywności działania priorytetów realizowanych w zintegrowanym systemie zarządzania ruchem SPRINT/ITS/SCATS wdrożonym w Bydgoszczy. Dla potrzeb analizy zrealizowany został model układu drogowego czterech skrzyżowań w ciągu ulicy Fordońskiej. We wstępie wymieniono dokładną lokalizację analizowanego układu drogowego oraz cel podjęcia tematu. Zdefiniowano również zakres przeprowadzonych badań i opisano wskaźnik efektywności. W głównej części artykułu przedstawiono szczegółowy opis każdego ze skrzyżowań znajdującego się na badanym odcinku układu drogowego. Następnie opisany został sposób sterowania w systemie SCATS, jak również sposób detekcji pojazdów transportu indywidualnego oraz zbiorowego. Dodatkowo omówiono sposób realizacji priorytetu dla pojazdów szynowych. Zdefiniowane zostały również cztery modele sterowania ruchem wybrane do porównania. Po wdrożeniu układu drogowego oraz zaimplementowaniu zdefiniowanych sposobów sterowania do badanego modelu, przeprowadzona została symulacja w programie PTV Vissim. Na jej podstawie uzyskane zostały wartości wskaźników oceniających efektywność wdrożonego rozwiązania. W podsumowaniu dokonano analizy wyników osiągniętych podczas przeprowadzonych symulacji. Dokonana została również analiza każdego z proponowanych rozwiązań priorytetu.

Słowa kluczowe: priorytet dla transportu miejskiego, SPRINT/ITS/SCATS, Vissim, model układu drogowego, modelowanie, system czasu rzeczywistego

Wprowadzenie

W 2015 roku zakończony został projekt systemu centralnego zarządzania ruchem i transportem publicznym pn. „Inteligentne systemy transportowe w Bydgoszczy". Poprzez rozwój infrastruktury technicznej, poprawę organizacji ruchu na skrzyżowaniach oraz wdrożenie nowoczesnego inteligentnego systemu zarządzania ruchem SPRINT/ITS/SCATS osiągnięta została poprawa warunków ruchowych na sieci drogowej objętej systemem [6].

Uzyskany wynik miał wpływ na wzrost atrakcyjności transportu publicznego. Wdrożenie systemu zarządzania ruchem, który zawierał wprowadzenie priorytetu dla pojazdów transportu publicznego, umożliwiło skrócenie czasu podróży tramwajów na odcinkach objętych priorytetem średnio o 13% [1].

W celu weryfikacji osiągniętych wyników oraz porównania dostępnych dla operatorów strategii sterowania, postanowiono zbudować model fragmentu układu drogowego Bydgoszczy. Do badań wykorzystano mikroskopowy model symulacji ruchu Vissim firmy PTV z Karlsruhe [3]. Po zamodelowaniu układu drogowego wykonano eksperymenty symulacyjne umożliwiające ocenę działania systemu dla badanych strategii sterowania. Jako miernik oceniający efektywność działania priorytetu w badanych strategiach przyjęto wartość czasu oczekiwania przez pojazdy na sygnały zezwalające. Badaniu poddano ciąg skrzyżowań na odcinku ulicy Fordońskiej od skrzyżowania z ulicą Polanka do skrzyżowania z ulicą Fabryczną.

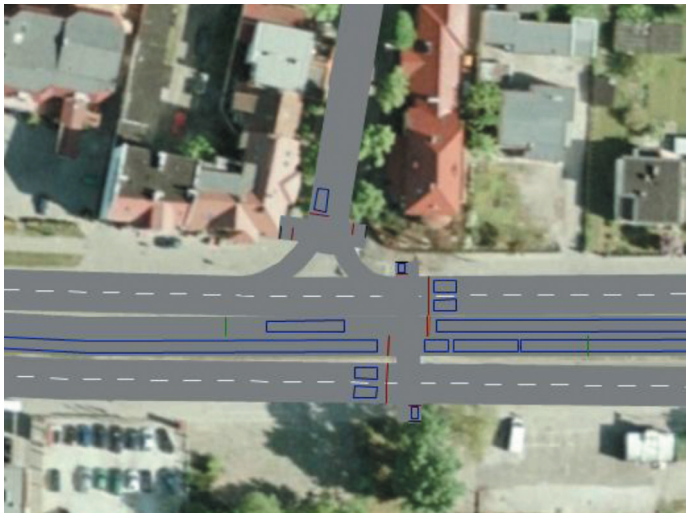
Model badanego ciągu ulic

Zamodelowano symulację ciągu ulicy Fordońskiej na odcinku między skrzyżowaniami z ulicami Polanka i Fabryczną. Ulica Fordońska jest fragmentem drogi krajowej nr 80, a rozważane skrzyżowania włączone są do pracy systemu ITS w Bydgoszczy. Trasa obsługuje ruch miejski i tranzytowy w relacjach wschód-zachód. Rozważany odcinek ulicy ma 1,5 kilometra długości. Szerokość pasa ruchu pojazdów przyjęto na 3,5 metra. Dwutorowe torowisko tramwajowe poprowadzone jest centralnie pomiędzy dwiema dwupasowymi jezdniami ulicy Fordońskiej. Na wybranym odcinku znajdują się 4 skrzyżowania z zainstalowaną sygnalizacją świetlną:

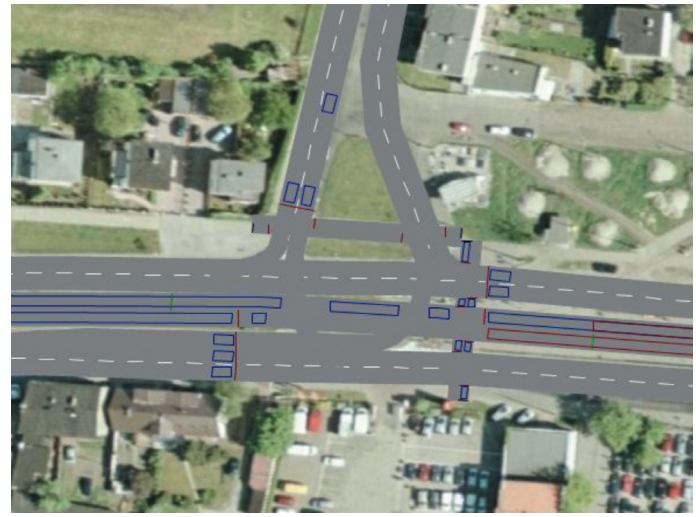
1. Skrzyżowanie ulic Fordońskiej z Polanka (numer ewidencyjny 15).
2. Skrzyżowanie ulic Fordońskiej z Bałtycką (numer 9).
3. Skrzyżowanie ulic Fordońskiej z Łęczycką i Kazimierza Wielkiego (numer 13).
4. Skrzyżowanie ulic Fordońskiej z Fabryczną i Oksywską (numer 10).

Ad.1. Skrzyżowanie typu T, z wlotem ulicy Polanka od strony północnej umożliwiającym włączenie się do ruchu tylko w północną jezdnię ulicy Fordońskiej. Obie jezdnie i torowisko ulic Fordońskiej przecina przejście dla pieszych. W rejonie skrzyżowania nie ma przystanków tramwajowych. Skrzyżowanie sterowane jest w dwóch fazach ruchu. Model skrzyżowania pokazano na rysunku 1.

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: M. Czerliński 40%, R. Ruść 40%, J. Suda 20%.



Rys. 1. Skrzyżowanie nr 1, ulic Fordońska – Polanka

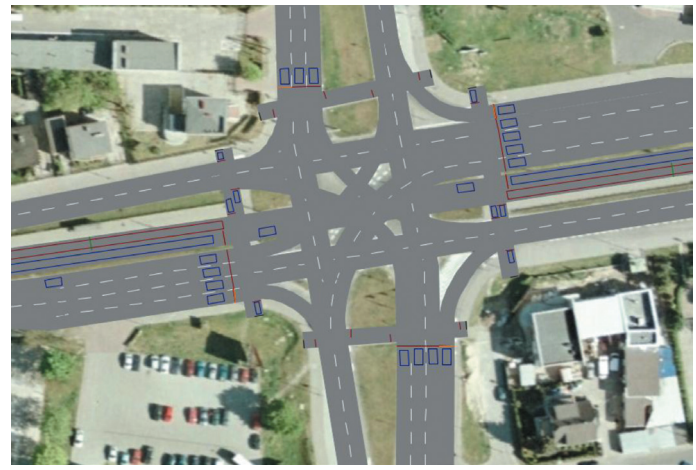


Rys. 2. Skrzyżowanie nr 2, ulic Fordońska – Bałtycka

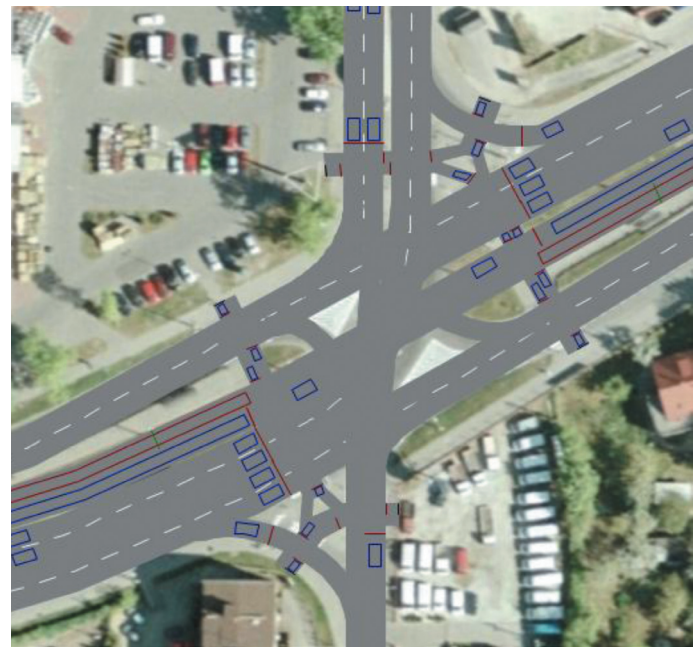
Ad.2. Skrzyżowanie typu T, z wlotem ulicy Bałtyckiej od strony północnej umożliwiającym wjazd na obie jezdnie ulicy Fordońskiej. Przejścia dla pieszych wyznaczono po stronie północnej i wschodniej tarczy skrzyżowania. Po wschodniej stronie skrzyżowania znajdują się przystanki tramwajowe obsługujące pasażerów w obu kierunkach oraz wjazd i wyjazd z pętli awaryjnej. Obecnie nie planuje się ruchu pasażerskiego wykonywanego z tej pętli, więc symulacja nie obejmuje modelu jej infrastruktury. Całe skrzyżowanie sterowane jest w 3 fazach ruchu. Model skrzyżowania pokazano na rysunku 2.

Ad.3. Skrzyżowanie typu X, z wlotem ulicy Łęczyckiej od strony północnej oraz ulicy Kazimierza Wielkiego od strony południowej. Przejścia dla pieszych wyznaczono po wszystkich stronach tarczy skrzyżowania. Przystanki tramwajowe zlokalizowano za skrzyżowaniem. Obiekt sterowany jest w 6 fazach ruchu. Model skrzyżowania pokazano na rysunku 3.

Ad. 4. Skrzyżowanie typu X. z wlotem ulicy Fabrycznej od strony północnej oraz ulicy Oksywskiej od strony południowej. Przejścia dla pieszych wyznaczono po wszystkich stronach tarczy skrzyżowania. Przystanki tramwajowe zlokalizowano za skrzyżowaniem. Obiekt sterowany jest w 4 fazach ruchu. Model skrzyżowania pokazano na rysunku 4.



Rys. 3. Skrzyżowanie nr 3, ulic Fordońska – Łęczycka



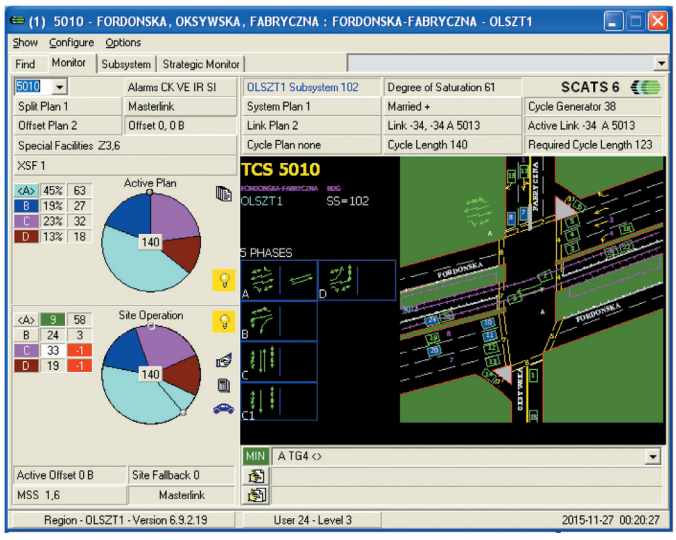
Rys. 4. Skrzyżowanie 4, ulic Fordońska – Fabryczna

Model symulacyjny

Wybrany ciąg ulicy zamodelowano w programie Vissim, umożliwiającym tworzenie mikrosymulacji ruchu na skrzyżowaniach i węzłach. W programie najpierw tworzony jest układ komunikacyjny, gdzie konfigurowane są pasy ruchu, struktura rodzajowa ruchu oraz struktura kierunkowa. Następnie dla stworzonej sieci implementuje się program sygnalizacji świetlnej, który pozwala obsłużyć zadany ruch. Program pozwala ocenić planowane rozwiązania inżynierii ruchu, opierając się na miarach efektywności takich jak: strata czasu, czas zatrzymań, czas przejazdu, prędkość średnia, liczba zatrzymań itd. [2]. Vissim pozwala modelować zarówno ruch pojazdów indywidualnych, jak i transportu publicznego (uwzględniając m.in. rozkład jazdy i postój na przystankach) oraz pieszych i rowerzystów [3].

Dla wybranego ciągu przyjęto rzeczywiste wartości natężeń ruchu pojazdów wraz ze strukturą kierunkową rozpływu pojazdów, pomierzone dla godziny szczytu dnia powszedniego. Zachowania kierowców w symulacji oparto o zaimplementowany w programie Vissim algorytm podążania za liderem, bazujący na opracowaniu Wiedemanna dotyczącym uogólnionego psychofizycznego modelu interakcji pojazd-pojazd [4]. Powierzchnia rozważanego obszaru jest płaska, a ruch w Bydgoszczy nie ma żadnych specyficznych cech, które wymagałyby korekty wyżej zastosowanego algorytmu.

Sterowanie na skrzyżowaniach zaimplementowano w Obszarowym Systemie Sterowania Ruchem SCATS. System pracuje w czasie rzeczywistym, optymalizując pracę sygnalizacji świetlnych na skrzyżowaniach: gromadząc dane z detektorów co sekundę oraz dostosowując plan sterowania z cyklu na cykl. System może regulować czas cyklu, czasy trwania faz sygnalizacyjnych oraz offsetu pomiędzy skrzyżowaniami przy pracy w koordynacji. Sygnalizacje świetlne mogą pracować nie tylko w koordynowanym ciągu, ale również w obszarze. Koordynacja polega na ustalonych wartościach offsetu pomiędzy skrzyżowaniami oraz wspólnym czasie cyklu, który może być zmienny w zależności od ruchu na najbardziej obciążonym skrzyżowaniu. Parametrem decydującym o długości cyklu i podziale czasu cyklu na fazy (splicie) jest stopień nasycenia DS (Degree of Saturation) [5]. Na rysunku 5 pokazano podstawowe okno skrzyżowania w systemie.



Rys. 5. Widok skrzyżowania w systemie SCATS

Detekcja pojazdów w symulacji opiera się na wirtualnych obszarach detekcji zlokalizowanych przy linii zatrzymania w jezdniach oraz w torowisku. W rzeczywistości obszary detekcji odpowiadają pętlom indukcyjnym, wideodetekcji lub innym detektorom pojazdów. Wskazuje się jednak, że najlepszą pracę systemu detekcji samochodów w SCATS zapewniają pętle indukcyjne o długości od 2,5 do 4 metrów. Dodatkowo tramwaje mają wprowadzone obszary detekcji oddalone do 400 m od sygnalizatora danej grupy sygnałowej, które odpowiadają punktom meldunkowym priorytetu. Dla każdego z kierunków jazdy tramwaju ustalono sekwencję dwóch punktów meldujących oraz jednego odmeldowującego zgłoszenie priorytetu, czyli wjazd na tarczę skrzyżowania. Fizycznie meldunek priorytetu może odbywać się za pomocą radia krótkiego zasięgu współpracującego z autokomputerem lub typowej detekcji pojazdów, np. pętli indukcyjnych lub wideodetekcji.

Na zadanym ciągu grupy tramwajowe uruchamiane są w fazach głównych (A), wraz z obsługą równoległych grup kołowych i pieszych. Grupy tramwajowe uruchamiane są zawsze w cyklu i czas ich sygnału zezwalającego może być wydłużany zgodnie z ustalonym planem sygnalizacji świetlnej. Sygnał ten może natomiast być wydłużany w nieskończoność, gdy na skrzyżowaniu nie ma żadnych wzbudzeń grup kolizyjnych.

Strategie sterowania

Dla zadanego ciągu ulicy Fordońskiej opracowano 4 strategie sterowania:

1. Praca w systemowym trybie izolowanym każdego z 4 skrzyżowań.
2. Praca w systemowym trybie dwukierunkowej koordynacji na całym ciągu.
3. Praca w systemowym trybie dwukierunkowej koordynacji z zastosowaniem priorytetu dla tramwajów na poziomie średnim.
4. Praca w systemowym trybie dwukierunkowej koordynacji z zastosowaniem priorytetu dla tramwajów na poziomie wysokim.

Poniżej opisano sposoby sterowania w przyjętych strategiach.

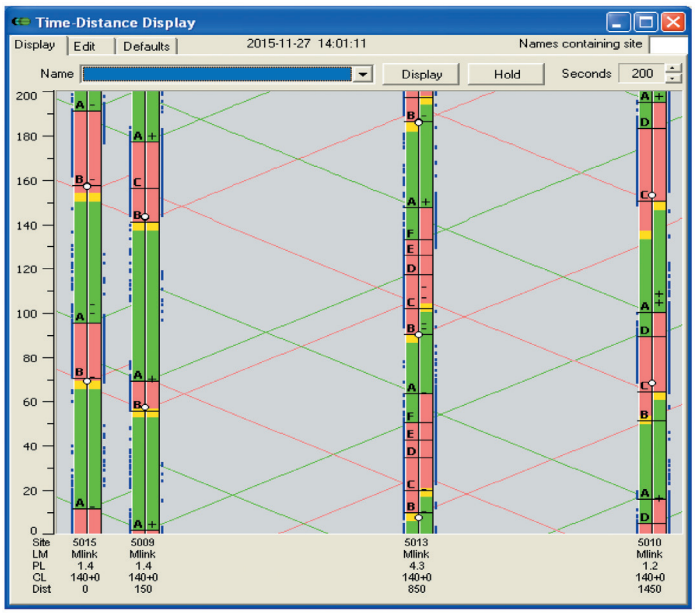
Ad. 1. Tryb izolowany uwzględnia pracę sygnalizacji na każdym skrzyżowaniu w cyklu odpowiadającym natężeniom ruchu na wlotach skrzyżowania. W efekcie każde ze skrzyżowań może pracować z inną wartością cyklu. W tym trybie priorytet dla tramwajów wyłączono. Przyjazd tramwaju wyłącznie zgłaszał zapotrzebowanie na fazę, a pojazd obsługiwany był zgodnie z bieżącym cyklem sygnalizacji świetlnej.

Ad. 2. Dwukierunkowa koordynacja uwzględnia pracę ze wspólnym czasem cyklu dla wszystkich skrzyżowań wzdłuż ciągu. Za wartość cyklu przyjmowana jest największa żądana wartość wynikająca ze stopnia nasycenia (DS) najbardziej obciążonego ruchem skrzyżowania. Koordynacja uwzględnia wiązki ruchu pojazdów samochodowych poruszających się w ciągu ulicy Fordońskiej. Wykres koordynacji dla zadanego ciągu przedstawiono na rysunku 6. W tym trybie priorytet dla tramwajów również wyłączono.

Ad. 3. W tym trybie uruchomiono priorytet na poziomie średnim przy zachowywaniu koordynacji dla pojazdów samochodowych. Priorytet na poziomie średnim był realizowany na dwa sposoby w zależności od momentu cyklu, w którym został zgłoszony. Reakcją na wywołanie priorytetu w fazie sprzyjającej grupom tramwajowym było wydłużanie czasu trwania tej fazy. W przypadku każdej innej fazy lub przejść międzyfazowych priorytet realizowany

był poprzez obsługę wszystkich żądanych faz w cyklu z minimalnym czasem trwania fazy i przejściem do obsługi fazy z tramwajem. Dla każdego ze skrzyżowań zdefiniowano maksymalny czas wydłużania fazy sprzyjającej tramwajowi, by zapobiec sytuacji, w której sygnał jest wydłużany, a pojazd szynowy nie ma możliwości opuszczenia skrzyżowania.

Ad. 4. Priorytet na poziomie wysokim, w przypadku zgłoszenia w fazie sprzyjającej tramwajowi, jest realizowany identycznie jak priorytet średni. Jednak w przypadku zgłoszenia w każdej innej fazie, po zgłoszeniu priorytetu następuje jak najszybsze zamknięcie bieżącej fazy (po spełnieniu czasu minimalnego) i bezpośrednie przejście do fazy sprzyjającej tramwajowi, z pominięciem innych faz w cyklu. Dla dużych skrzyżowań, np. z wyspą centralną, przed przejściem do fazy tramwajowej może wystąpić tzw. faza czyszcząca, opróżniająca obszary przejazdów przez torowiska, w których mogłyby akumulować się pojazdy. Podobnie jak przy priorytecie średnim, dla każdego ze skrzyżowań wprowadzono maksymalny czas wydłużania fazy sprzyjającej.



Rys. 6. Wykres koordynacji linowej badanego ciągu ulic

Symulacja ruchu w przyjętych strategiach

W celu oceny efektywności priorytetów przeprowadzono symulację ruchu dla każdego z typów sterowania. Przyjęto godzinny okres pracy symulacji, a pomiar rozpoczynano po 6 minutach, po napełnieniu sieci pojazdami. Zmierzono czasy zatrzymań pojazdów w sekundach, wynikające z oczekiwania na sygnał zezwalający sygnalizacji świetlnej. Na podstawie wyników pomiarów obliczono średni czas oczekiwania oraz odchylenie standardowe tego czasu uzyskiwane przez tramwaje i pozostałe pojazdy. Pierwszy tryb pracy systemu przyjęto za wartość porównawczą w stosunku do pozostałych trybów. Na podstawie wyników określono procentową zmianę czasu oczekiwania. Końcowe zestawienie wyników przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Średni czas oczekiwania oraz odchylenie standardowe czasu oczekiwania przez pojazdy w poszczególnych strategiach pracy systemu

Strategia sterowania w systemie	Skrzyżowania izolowane	Koordynacja bez priorytetu	Koordynacja z priorytetem średnim	Koordynacja z priorytetem wysokim
Średni czas oczekiwania przez tramwaj [s]	60,07	64,50	23,55	6,53
Odchylenie standardowe czasu oczekiwania przez tramwaj [s]	46,50	47,84	26,92	8,47
Zmiana czasu oczekiwania przez tramwaj w stosunku do trybu izolowanego [%]	0	+7,4	-60,8	-89,1
Zmiana odchylenia standardowego w stosunku do trybu izolowanego [%]	0	+2,9	-42,1	-81,8
Średni czas oczekiwania przez samochody [s]	80,30	68,37	67,90	69,10
Odchylenie standardowe czasu oczekiwania samochodów [s]	59,21	59,35	61,63	82,23
Zmiana czasu oczekiwania przez samochody w stosunku do trybu izolowanego [%]	0	-14,9	-15,4	-13,9
Zmiana odchylenia standardowego samochodów w stosunku do trybu izolowanego [%]	0	+0,2	+4,1	+38,9

Tabela 2

Liczba pojazdów obsłużonych w czasie trwania symulacji

Tryb pracy systemu	Izolowany	Koordynowany bez priorytetu	Koordynowany z priorytetem średnim	Koordynowany z priorytetem wysokim
Pojazdy samochodowe	4685	4673	4721	4557
Tramwaje	27	26	28	28

Program Vissim w sposób losowy generuje pojazdy dla zadanych wartości natężeń. W tabeli 2 zestawiono sumę liczby pojazdów, które pojawiły się w strefie pomiaru. Maksymalna różnica między skrajnymi liczbami pojazdów samochodowych wynosi 3,6%, a dla tramwajów 7,7%. Na tej podstawie uznano wpływ liczby pojazdów na wyniki pomiarów przedstawionych w tabeli 1 za pomijalny.

Podsumowanie

Pomiar czasu oczekiwania w trybie systemowej pracy izolowanej stanowił punkt odniesienia dla pozostałych pomiarów. W przypadku tramwajów uzyskano wysoki średni czas oczekiwania 60 sekund. Jednocześnie wystąpiło duże rozproszenie wyników, o czym świadczy wysoka wartość odchylenia standardowego. Oznacza to, że w tym trybie obsługa tramwajów przez sygnalizację byłaby nieregularna i nie sprzyjałaby utrzymaniu punktualności względem rozkładu jazdy.

W strategii 2, przy pracy koordynowanej z priorytetem dla strumienia pojazdów samochodowych, nastąpił niewielki wzrost czasu oczekiwania tramwajów (+7,4%) oraz odchylenia standardowego (+2,9%) w stosunku do pracy izolowanej. Wzrost ten wynika z wydłużenia czasu długości cyklu dla koordynowanych skrzyżowań do wartości cyklu

żądanego przez najbardziej obciążone skrzyżowanie. Koordynacja nie sprzyja też tramwajom ze względu na lokalizację większości przystanków za skrzyżowaniami. Tramwaj po zatrzymaniu na przystanku traci udział w wiązce koordynacyjnej samochodów i w efekcie dojeżdża do następnego skrzyżowania pod koniec trwania fazy sprzyjającej. Niektóre tramwaje nie zdążyły przejechać w bieżącym cyklu przez kolejne skrzyżowanie i ostatecznie musiały odczekać cykl.

Przy wprowadzeniu priorytetu na poziomie średnim średni czas oczekiwania tramwajów skrócono o ponad połowę (–60,8%). Przy priorytecie wysokim czas oczekiwania zmniejszył się o prawie 90%. Jednocześnie znacznie zmniejszyło się rozproszenie wyników, co oznacza, że priorytet zapewnia bardziej regularny ruch tramwajów, przyczyniający się do wzrostu punktualności. Dalsza redukcja czasu oczekiwania możliwa byłaby po zwiększeniu odległości punktów zgłoszenia priorytetu od kluczowych skrzyżowań, co wiąże się niestety z jeszcze większym pogorszeniem warunków ruchowych dla samochodów.

Mimo zastosowania priorytetu dla tramwajów, średni czas oczekiwania samochodów przy zachowywanej koordynacji (67–69 s) jest niższy niż przy pracy izolowanej skrzyżowań dla cyklu o długości 80 s. Wynika to z faktu, że największy strumień pojazdów porusza się w wiązce koordynacyjnej na kierunku głównym, a tramwaje obsługiwane są również w fazie głównej. Wzrost czasu oczekiwania na kierunkach podporządkowanych kompensowany jest więc przez jego spadek dla kierunku koordynowanego. Różnica w czasie oczekiwania pojazdów przy koordynacji, niezależnie od poziomu priorytetu, jest więc niewielka.

Maksymalna rozpiętość czasu to 1,2 s. Wpływ pojazdów oczekujących na wlotach podporządkowanych zauważalny jest jednak w znacznym wzroście odchylenia standardowego w trybie pracy z priorytetem wysokim, o 38,9% względem trybu izolowanego.

Uzyskane wyniki odpowiadają rzeczywistym rezultatom wdrożenia priorytetów dla tramwajów w Bydgoszczy. Ze względu na opisane powyżej zależności, na stałe wprowadzono w mieście priorytety systemowe na poziomie średnim. Pozwoliło to uprzywilejować transport publiczny, przy zachowaniu warunków ruchu dla samochodów na akceptowalnym poziomie. W efekcie wzrosła punktualność tramwajów, a także zmieniono rozkłady jazdy, w których skrócono czas podróży tramwajów na liniach poruszających się w obszarze ITS średnio o 10% [6].

Program Vissim zapewnia możliwość badania algorytmów sterowania realizowanych przez system zarządzania i sterowania ruchem SPRINT/ITS/SCATS. Pozwala to sprawdzić efektywność planowanego rozwiązania w kontrolowanym środowisku i ograniczyć możliwość wystąpienia niepożądanych efektów w rzeczywistości.

Temat oceny działania priorytetów dla tramwajów może być dalej rozwijany. Na podstawie uzyskanych strat czasu można oszacować łączną sumę strat dla kierowców i pasażerów w każdym trybie pracy systemu, co pozwoliłoby na dobór rozwiązania optymalnego. Analizowany ciąg można podzielić na poszczególne skrzyżowania i zbadać efektywność priorytetów dla każdego z nich. Ponadto można podjąć próbę zbilansowania strat czasu dla pojazdów poruszających się na kierunku głównym oraz podporządkowanym.

Posłowie od autorów

W I kwartale 2015 roku ukończono realizację projektu Inteligentne Systemy Transportowe w Bydgoszczy. Jednym z podsystemów centralnego systemu zarządzania ruchem i transportem publicznym był system sterowania ruchem obejmujący 52 skrzyżowania i przejścia z sygnalizacją świetlną, z czego 26 obsługujących ruch tramwajowy. Priorytet dla tramwajów udzielany jest na podstawie zgłoszeń pochodzących z nadajników radia krótkiego zasięgu zainstalowanych w pojazdach i przekazywanych do odbiorników umieszczonych w sterownikach sygnalizacji świetlnej. Łącznie w 80 wagonach zainstalowano nadajniki sygnału priorytetu.

Obecnie system jest rozszerzany o kolejne skrzyżowania z sygnalizacją świetlną, znajdujące się na prawie 10-kilometrowej trasie tramwaju do Fordonu. Do pracy systemowej z priorytetem dla tramwajów włączonych zostanie 12 skrzyżowań. Dla uzyskania lepszych efektów pracy systemu sterowania dotyczącego transportu szynowego algorytm priorytetu rozszerzony zostanie o możliwość uruchomienia fazy obsługującej tramwaje po dowolnej fazie ruchu, z zapewnionym powrotem do fazy kolejnej w cyklu po zakończeniu obsługi zgłoszonego tramwaju. Wdrożenie priorytetu, według szacunków ZDMiKP Bydgoszcz, ma skrócić czas przejazdów tramwajów na nowej trasie o około 5 minut [7].

W aspekcie sprawdzenia efektów działania systemu w środowisku symulacyjnymVissim możliwa więc będzie ocena działania zarówno modelu symulacyjnego, jak również strategii sterowania.Zrealizowany model symulacyjny nowej części sieci umożliwi porównanie uzyskanych wyników ze strategiami stosowanymi wcześniej, a także z wariantami wyłączonego priorytetu.

Literatura

1. http://zdmikp.bydgoszcz.pl/index.php/pl/inwestycje-i-projekty/2478-its-to-juz-sie-oplaca , dostęp 2015.11.25 r.
2. PTV AG, PTV Vissim First Steps Tutorial, Karlsruhe, Niemcy, 2014.
3. PTV AG, PTV Vissim User Manual, Karlsruhe, Niemcy, 2014.
4. Wiedemann R., *Simulation des Straßenverkehrsflusses,* "Schriftenreihe des IfV", Vol. 8 (Institut fur Verkehrswesen, University of Karlsruhe, Germany, 1974).
5. SCATS Region 6.9.2 User Manual, Strawberry Hills, Australia 2013
6. http://zdmikp.bydgoszcz.pl/index.php/pl/aktualnosci-2/aktualnosci-komunikacja/2771-tramwaje-przyspiesza-i-zmienia-trasy-od-01-08-2015-r , dostęp 2015.11.25 r.
7. http://www.zdmikp.bydgoszcz.pl/index.php/pl/aktualnosci-2/aktualnosci-komunikacja/3389-tramwajem-jak-metrem-co-3-minuty

Rozbudowa Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego w ramach projektu Rozwój Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie[1]

PIOTR DERA
mgr inż., Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie, Zespół Organizacji Transportu, ul. Centralna 53, 31-586 Kraków, e-mail: pdera@zikit.krakow.pl

MICHAŁ WOJTASZEK
mgr inż., Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie, Zespół Organizacji Transportu, ul. Centralna 53, 31-586 Kraków, e-mail: mwojtaszek@zikit.krakow.pl

Streszczenie: Przedmiotem artykułu jest opis rozbudowy Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego w ramach projektu Rozwoju Systemu Zarządzania Transportem Publicznym, realizowanego przez Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie w latach 2013– 2015. Autorzy w pierwszej kolejności zaprezentowali cele oraz historię budowy Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego, który realizowany jest w Krakowie od 2005 roku. Następnie omówiono poszczególne elementy systemu i jego funkcjonalność. W dalszej części artykułu zaprezentowano założenia realizowanego projektu rozbudowy Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego, a także opisano jego najważniejsze nowe elementy. Na zakończenie przedstawiono wizje planów na przyszłość, dotyczących rozwoju Systemu TTSS, realizowanych również przy ewentualnym udziale środków pochodzących z Unii Europejskiej.

Słowa kluczowe: transport pasażerski, zarządzanie transportem zbiorowym, nadzór ruchu tramwajowego

Wprowadzenie

Konieczność przemieszczania jest jedną z charakterystycznych cech ludzi od czasów prehistorycznych. Wraz z rozwojem cywilizacji, a w szczególności miast, rozrastała się również infrastruktura komunikacyjna. We współczesnym świecie ludzie chcą przemieszczać się coraz szybciej i pewniej. Przybywa pojazdów na ulicach naszych miast, gdzie funkcjonują również środki transportu publicznego. Negatywnym skutkiem rosnącego ruchu są zakłócenia w jego prawidłowym funkcjonowaniu, które coraz gorzej są odbierane przez mieszkańców.

Szybkie przekazanie pasażerom pojazdów komunikacji miejskiej i kierowcom pojazdów indywidualnych informacji o występujących utrudnieniach zwiększa szanse na to, że ludzie podejmą próbę ich ominięcia, na przykład poprzez zmianę środka transportu. Informacja ta również jest niezbędna osobom nadzorującym funkcjonowanie transportu, aby mogły one szybko zareagować na nieprzewidziane sytuacje wpływając na optymalizację podejmowanych decyzji. W związku z tym w obecnych czasach coraz większą wagę zyskują różnorodne systemy nadzorujące ruch na ulicach miast, zarówno drogowy, jak i komunikacji miejskiej [1,2]. Elementami takich systemów są: Obszarowy System Sterowania Ruchem, który odpowiada za działanie sygnalizacji świetlnej, a także System Nadzoru Ruchu Tramwajowego, który jest tematem tego artykułu. Pierwszy system odpowiada za nadzór nad działaniem sygnalizacji świetlnych, a także jest w stanie zareagować w przypadku wykrycia anomalii występujących w sieci drogowej. Drugi system nadzoruje ruch pojazdów tramwajowych, dzięki czemu może poinformować pasażerów o rzeczywistym czasie oczekiwania na pociąg tramwajowy na konkretnym przystanku. Budowa obu systemów współpracujących ze sobą rozpoczęła się w Krakowie na początku obecnego wieku. Dziś, po dekadzie prac inżynierskich, Kraków jest na półmetku procesu, który docelowo powinien objąć całą sieć komunikacyjną miasta, zarówno drogową, jak i transportu zbiorowego.

Cel budowy Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego

W ramach budowy pierwszej linii Krakowskiego Szybkiego Tramwaju podjęto decyzję o rozpoczęciu tworzenia Systemu Sterowania Ruchem. W 2005 roku Agencja Rozwoju Miasta podpisała umowę z konsorcjum firmy Siemens, złożonym z polskiego i niemieckiego oddziału, na realizację systemu składającego się z dwóch elementów:

- Systemu Sterowania Ruchem UTCS – odpowiedzialnego za sterowanie sygnalizacjami świetlnymi oraz za nadzór nad ich prawidłowym funkcjonowaniem,
- Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego TTSS – odpowiedzialnego za nadzór nad ruchem tramwajów oraz za sterowanie tablicami informacji pasażerskiej.

Oba systemy planowano uruchomić w 2007 roku, ale z uwagi na opóźnione prace budowlane związane z przebudową rond Mogilskiego i Grzegórzeckiego, a także realizacją tunelu tramwajowego pod Dworcem Głównym, ich uruchomienie przesunęło się o rok, a końcowa kalibracja Systemu Sterowania Ruchem trwała aż do 2010 roku.

Podstawowym celem realizacji Systemu Sterowania Ruchem było przyspieszenie przejazdu pociągów tramwajowych w tak zwanym Korytarzu Szybkiego Tramwaju KST (czyli na trasie linii 50), prowadzącym z pętli na Kurdwanowie przez ulice Wielicką, Starowiślną, Grzegórzecką, aleję Powstania Warszawskiego, tunel tramwajowy do pętli Krowodrza Górka. Drugim założeniem przy tworzeniu systemu było usprawnienie przejazdu dla ruchu in-

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: P. Dera 50%, M. Wojtaszek 50%.

dywidualnego przez ciąg drogowy od alei 29 Listopada, przez aleje Trzech Wieszczy, ulic Konopnickiej, Kamieńskiego do ulicy Wielickiej, jako swoistej rekompensaty dla kierowców, wynikającej z przyznania priorytetu dla tramwajów w korytarzu KST.

Aby zrealizować te cele, niezbędne było powstanie nie tylko samego systemu dedykowanego do sterowania sygnalizacjami świetlnymi, ale również drugiego systemu, który miał być odpowiedzialny za lokalizację pociągów tramwajowych na terenie miasta, będąc również wykorzystywany do realizacji następujących funkcji:

- kontroli punktualności realizacji rozkładu jazdy, identyfikacji miejsc, w których rozkładowy czas przejazdu różni się od rzeczywistego;
- realizacji priorytetu dla pociągów tramwajowych na skrzyżowaniach z sygnalizacja świetlną;
- realizacji predykcji czasów przyjazdu pociągów tramwajowych na przystanki, celem wyświetlenia na tablicach Dynamicznej Informacji Pasażerskiej.

System Nadzoru Ruchu Tramwajowego firmy Trapeze

Wraz z Obszarowym Systemem Sterowania Ruchu wdrożono również System Nadzoru Ruchu Tramwajowego TTSS (Tram Traffic Supervision System). System ten zaprojektowany został przez firmę Siemens VDO, która w wyniku dalszych przekształceń obecnie nosi nazwę Trapeze Switzerland GmbH i wciąż oferuje tego typu rozwiązania informatyczne.

System Nadzoru Ruchu Tramwajowego w początkowej konfiguracji składał się z następujących elementów [3]:

- autokomputerów IBISPlus zamontowanych w tramwajach (196 pociągów tramwajowych);
- serwerów sterujących i koordynujących pracę systemu zainstalowanego w centrum sterowania ZIKiT;
- 44 tablic informacji pasażerskiej zamontowanych na przystankach pierwszej linii KST (po jednej na peron przystankowy oprócz peronów dla wysiadających na pętlach);
- dwóch stacji dyspozytorskich umieszczonych w siedzibie ZIKiT przy ulicy Centralnej i Głównej Dyspozytorni Ruchu MPK przy ulicy św. Wawrzyńca umożliwiając nadzór nad transportem zbiorowym;
- serwerów i access-pointów zamontowanych w zajezdniach w celu komunikacji pomiędzy systemem a pojazdami.

Każdy z tramwajów podłączonych do systemu TTSS wyposażony został w autokomputer IBISPlus, składający się z następujących elementów:

- radia GPRS do komunikacji z serwerami,
- karty pamięci z bazą danych o rozkładach jazdy,
- odbiorników GPS do lokalizacji pozycji,
- radia analogowego do łączności ze sterownikami sygnalizacji świetlnej.

Dodatkowo w kabinie motorniczego w tramwajach zainstalowano elektroniczne panele, za pomocą których prowadzący pojazd ma możliwość korzystania z informacji zapisanych w komputerze. Motorniczy po zalogowaniu się i wyborze odpowiedniej linii i kursu w trakcie przejazdu po mieście na bieżąco ma wyświetlane informacje o następnych przystankach, przystanku końcowym i odchyłce od rozkładu jazdy.

Wszystkie informacje o położeniu, odchyłce od rozkładu jazdy itp. są przesyłane do Centrum Sterowania Ruchem ZIKiT, wyświetlane na ekranie stacji dyspozytorskich i zapisywane w tzw. logach. Informacje te mogą posłużyć do nadzoru nad transportem zbiorowym czy określania miejsc, w których występują utrudnienia w ruchu. Podstawowym celem tych informacji jest wykorzystanie ich w określeniu predykcji czasów przyjazdu na poszczególne przystanki, by móc następnie wyświetlić informację o przewidywanych czasach odjazdów na tablicach Dynamicznej Informacji Pasażerskiej znajdujących się na przystankach.

W obrębie skrzyżowań objętych Obszarowym Systemem Sterowania Ruchem tramwaj, zbliżając się do sygnalizacji świetlnej, wysyła telegram poprzez radio analogowe do sterownika sygnalizacji świetlnej. Dzięki temu sterownik, posiadając odpowiedni program sygnalizacyjny oraz otrzymując informację o zbliżającym się pojeździe, jego odchyłce od rozkładu jazdy i kierunku dalszego przemieszczania się, może przygotować przejazd przez skrzyżowanie bez zatrzymania. W przypadku większych skrzyżowań o bardziej skomplikowanym algorytmie sterowania może być wykorzystywanych kilka telegramów (wysyłanych w zależności od położenia od skrzyżowania lub innych zdarzeń jak zamykanie/otwieranie drzwi pojazdu). Pojazd po opuszczeniu skrzyżowania wysyła kolejny telegram z informacją, że opuścił skrzyżowanie i sygnalizacja świetlna wraca do normalnej pracy.

W ramach systemu TTSS wykonano dwie stacje dyspozytorskie o identycznej funkcjonalności. Zainstalowana aplikacja umożliwia określenie lokalizacji poszczególnych pociągów tramwajowych wraz z numerem linii, którą obsługują, kierunkiem jazdy oraz numerem służbowym prowadzącego pojazd. Widoczna jest również odchyłka od rozkładu jazdy, a dzięki zastosowaniu odpowiedniego rozróżnienia kolorów operator od razu widzi, czy dany pojazd jedzie planowo, jest opóźniony czy przyspieszony. Powyższe dane można odczytać dla wszystkich pojazdów z podziałem na poszczególne linie i ich trasy, zarówno na diagramie, jak i tabelarycznie. Aplikacja umożliwia również ręczne sterowanie tablicami Dynamicznej Informacji Pasażerskiej poprzez wyświetlanie informacji o występujących utrudnieniach zarówno w ostatniej linijce tablic DIP, jak i w miejscu prezentacji końcówki, do której zmierza dana linia. Możliwe jest również całkowite wyłączenie tablic lub tylko prezentacji poszczególnych kursów. Wszystkie informacje dostarczane na stacje dyspozytorskie oraz operacje na nich wykonywane są zapisywane w archiwum.

Nowe elementy systemu nadzoru ruchu tramwajowego w kolejnych latach

W ramach prowadzonych inwestycji przez Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu w Krakowie na terenie całego miasta do Systemu Nadzoru Ruchu

Tramwajowego włączane były kolejne ciągi tramwajowe, na których instalowano nowe tablice Dynamicznej Informacji Pasażerskiej. Były to następujące projekty:

- modernizacja ciągu tramwajowego ulic Franciszkańskiej i Dominikańskiej – 7 nowych tablic DIP – 2010 rok;
- budowa linii tramwajowej na Mały Płaszów – 13 nowych tablic DIP – 2010 rok;
- budowa linii tramwajowej łączącej ulicę Brożka oraz Kampus UJ wraz z systemem sterowania ruchem i nadzoru – I etap – 18 nowych tablic DIP – lata 2012–2013;
- budowa linii tramwajowej, łączącej ulicę Brożka oraz Kampus UJ wraz z systemem sterowania ruchem i nadzoru – II etap – 27 nowych tablic DIP – 2013 rok;
- przebudowa linii tramwajowej na odcinku Rondo Mogilskie – aleja Jana Pawła II – Plac Centralny wraz z systemem sterowania ruchem w Krakowie – 2 nowe tablice DIP – 2014 rok;
- budowa estakady tramwajowej pomiędzy ulicami Wielicką i Lipską – 3 nowe tablice DIP – 2015 rok.

Rozbudowa Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego w ramach projektu Rozwoju Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie

Pozytywne efekty uruchomienia Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego skłoniły ZIKiT do jego rozbudowy, tak aby elementy systemu objęły wszystkie pociągi tramwajowe i większość przystanków tramwajowych na terenie miasta z przygotowaniem systemu do dalszego rozwoju na sieć autobusową [4].

W tym celu w ramach projektu pn. „Rozwój Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie" przygotowany został Kontrakt 1: Rozbudowa Systemu Zarządzania Transportem Publicznym (TTSS). Kontrakt ten dodatkowo podzielono na dwa etapy, będące jednocześnie dwoma osobnymi kontraktami. Ich najważniejsze elementy to:

Etap I – Rozwój systemu centralnego wraz z dostawą interfejsów do wymiany danych:

- rozwój systemu centralnego, aplikacji dyspozytorskiej i systemów zajezdniowych;
- aktualizacja oprogramowania użytkowanego w komputerach pokładowych oraz tablicach informacji pasażerskiej;
- dostawa zestawu interfejsów dla wymiany danych z zewnętrznymi systemami informacji;
- dostawa oprogramowania do analizy i raportowania danych statystycznych pochodzących z systemu TTSS.

Etap II – Rozbudowa Systemu Zarządzania Transportem publicznym (TTSS):

- integracja z Systemem Zarządzania Transportem Publicznym części floty tramwajowej,
- rozszerzenie systemu dynamicznej informacji pasażerskiej,
- dostawa i montaż tablic prezentujących informacje o sieci komunikacyjnej Krakowa,

W ramach powyższych kontraktów przewidziane zostały między innymi następujące elementy:

- dostawa i instalacja niezbędnych urządzeń, materiałów i oprogramowania (niezbędnego sprzętu IT i oprogramowania) dla wykonania przedmiotowego zadania wraz dostarczeniem licencji na oprogramowania,
- dostawa i wymiana istniejących kart sieciowych (modemów) WiFi w 196 komputerach pokładowych z podwyższonym standardem zabezpieczenia połączeń,
- dostawa i instalacja układów zapowiedzi głosowych w 37 tablicach DPI,
- dostawa i instalacja oprogramowania niezbędnego dla dokonania aktualizacji w 196 komputerach pokładowych i 110 tablicach DPI wraz z dostawą licencji na oprogramowania,
- dostawa 30 komputerów pokładowych (samej jednostki centralnej ze wszystkimi niezbędnymi modułami i panelami kierowców (MDT – Mobile Data Terminal) wraz z oprogramowaniem i licencjami,
- dostawa i instalacja 203 kompletnych i oprogramowanych tablic DPI na określonych przystankach tramwajowych na terenie miasta Krakowa wraz z dostarczeniem licencji na oprogramowanie,
- dostawa i instalacja 14 kompletnych przedmiotowych tablic na określonych miejscach na terenie miasta Krakowa.

Przetargi na realizację obu kontraktów w 2013 roku wygrało konsorcjum firm Trapeze, składające się z polskiego i szwajcarskiego oddziału. Rozbudowy Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego podjęła się więc firma, która kilka lat wcześniej stworzyła go w Krakowie.

Nowe tablice Dynamicznej Informacji Pasażerskiej

Najbardziej dostrzegalnym dla pasażerów efektem prowadzonego projektu był montaż 203 nowych tablic Dynamicznej Informacji Pasażerskiej (DIP) uzupełniony o 14 ekranów LCD prezentujących informacje o sieci komunikacyjnej Krakowa (fot.1). Przed rozpoczęciem realizacji projektu na przystankach na terenie Krakowa zlokalizowanych było 109 tablic DIP, przy czym 44 były to najstarsze urządzenia, posiadające tylko trzy linijki do wyświetlania informacji. W wyniku realizacji projektu, a także montażu jeszcze kilku dodatkowych tablic w ramach innych inwestycji, właściwie wszystkie przystanki tramwajowe na terenie Krakowa wyposażone zostały w tablice DIP, prezentujące informację o przewidywanych czasach przyjazdu pociągów tramwajowych na przystanek. Urządzenia te nie zostały jedynie zainstalowane na trasach tramwajowych na Walcownię i do Pleszowa, a także na przystanku „Elektromontaż". We wszystkich tych przypadkach trasy tramwajowe przebiegają jednak przez teren mało zurbanizowany, a linie tramwajowe charakteryzują się znacznym zużyciem infrastruktury. Jednak w ramach innej inwestycji przewidziano montaż tablicy na pętli w Pleszowie, która w najbliższym czasie ma być poddana gruntownej przebudowie.

Fot. 1. Widok tablicy Dynamicznej Informacji Pasażerskiej. Fot. Michał Wojtaszek

W zakresie realizowanego projektu stosowane były przede wszystkim tablice pięciowierszowe, znane na ulicach Krakowa z wcześniejszych inwestycji. Tablice te zastąpiły również najstarsze wyświetlacze na trasie Krakowskiego Szybkiego Tramwaju. Stare tablice nie zostały jednak wycofane z eksploatacji. Pomimo siedmiu lat nieustannej pracy na krakowskich przystankach pierwsze wyświetlacze niezmiennie sprawują się bardzo dobrze, dzięki czemu mogły zostać przeniesione na przystanki, przez które przebiega mniejsza liczba linii. Tablice te zainstalowano między innymi na trasie na Cichy Kącik oraz na terenie Nowej Huty.

Poza standardowymi tablicami pięciowierszowymi na najbardziej obciążonych przystankach zainstalowano duże tablice prezentujące od 8 do 10 odjazdów, w zależności od zastosowanej wielkości czcionki. Urządzenia te pojawiły się między innymi na przystankach przy pierwszej obwodnicy.

Wszystkie tablice, za wyjątkiem najstarszych 44 wyświetlaczy, wyposażone zostały w przycisk służący do uruchamiania zapowiedzi głosowej dla osób niewidomych i niedowidzących. Przycisk posiada dźwiękowe naprowadzanie, dzięki czemu nawet osoba niewidoma jest w stanie go namierzyć i uruchomić. Po jego naciśnięciu, syntezator mowy odczytuje przewidywany czas odjazdu kolejnych kursów prezentowanych na tablicy. Dodatkowo odczytywany jest komunikat dla pasażerów, jeżeli został on ustawiony przez operatora systemu.

Na masztach wszystkich tablic planowane jest również umieszczenie kodu QR, dzięki czemu osoby posiadające telefony komórkowe z odpowiednią aplikacją po zeskanowaniu kodu będą w stanie uzyskać informację o przewidywanych czasach odjazdu z danego przystanku w dowolnym momencie.

Poza tablicami LED na ulicach Krakowa zainstalowanych zostało 14 ekranów LCD, przeznaczonych do prezentacji informacji o sieci komunikacyjnej Krakowa. Tablice te pojawiły się między innymi w rejonie Dworca Głównego, na rondzie Mogilskim oraz na placu Inwalidów. Obecnie prezentowane są na nich najbliższe odjazdy pociągów tramwajowych z węzłów, przy których są zainstalowane. Dodatkowo na tablicach znajduje się schemat danego węzła, a także pojawiają się informacje ogólne i związane z ewentualnymi utrudnieniami w ruchu oraz pogoda na najbliższe dni. Tablice te są pomocne szczególnie w przypadku, gdy tramwaje jadące w jednym kierunku odjeżdżają z dwóch różnych przystanków. Wówczas pasażer nie musi szukać właściwego przystanku i sprawdzać godziny odjazdu na tablicach peronowych, tylko w jednym miejscu może sprawdzić czas odjazdu najbliższych kursów, po czy od razu udać się na najbliższy przystanek.

Warto jeszcze wspomnieć o symbolu sygnalizującym pasażerom kurs obsługiwany przez tabor niskopodłogowy, który pojawił się na tablicach DIP również w ramach realizowanego projektu. Obecnie bowiem, jeżeli dany kurs obsługiwany jest przez pojazd posiadający niską podłogę, wówczas na tablicy obok numeru linii i nazwy końcówki pojawia się symbol wózka inwalidzkiego. Dzięki temu pasażerowie, posiadając informację o zbliżającym się tramwaju niskopodłogowym, mogą pominąć wcześniejsze kursy obsługiwane przez tabor niedostosowany do potrzeb osób o ograniczonej zdolności ruchowej i wybrać komfortowy tramwaj.

Nowe autokomputery w pojazdach

W ramach projektu budowy Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego w latach 2005–2008, jak wspomniano powyżej, zakupionych i zainstalowanych zostało 196 kompletów autokomputerów pokładowych IBISPlus. Na terenie Krakowa w dzień roboczy kursowało wówczas w przybliżeniu 220 pociągów na około 250 pociągów tramwajowych w inwentarzu MPK. Biorąc jednak pod uwagę, że tablice DIP oraz priorytet dla tramwajów na sygnalizacjach świetlnych funkcjonowały wówczas tylko na ciągu pierwszej linii Krakowskiego Szybkiego Tramwaju, taka liczba autokomputerów była wystarczająca. Oczywistym był jednak fakt, że w przypadku rozwoju Systemu, wszystkie pociągi tramwajowe będą musiały zostać wyposażone w tego typu urządzenia.

Krakowskie MPK, będące operatorem sieci tramwajowej, w ramach zakupu nowego taboru uwzględniało również zakup i montaż nowych autokomputerów, dzięki czemu ich liczba uległa zwiększeniu (na przykład dzięki dostawie 24 wagonów tramwajowych Bombardier NGT8). Wciąż jednak brakowało urządzeń do wszystkich pojazdów. W związku z tym w ramach prowadzonego projektu unijnego zdecydowano się na zakup 30 autokomputerów, z jednoczesną aktualizacją i ujednoliceniem oprogramowania w urządzeniach już stosowanych w krakowskich tramwajach.

W ramach projektu uwzględniono również rozszerzenie dotychczasowej funkcjonalności autokomputerów, które obecnie w znacznej części zajmują się również sterowaniem informacji pokładowej, w tym zarówno wyświetlaczy, jak i zapowiedzi głosowych, a także kontroli działania automatów biletowych czy kasowników. Jedynie w przypadku najstarszych typów wyświetlaczy nie udało się podłączyć urządzeń do autokomputera, ale wyłącznie z powodu braku możliwości uzyskania opisu protokołów komunikacji.

Biorąc pod uwagę zakup nowych 30 autokomputerów w ramach prowadzonego projektu, a także realizowaną obecnie przez krakowskie MPK dostawę 36 wagonów PESA 2014N, wyposażonych fabrycznie w auokomputery IBISPlus, na początku 2016 roku wszystkie pociągi tramwajowe powinny już być wyposażone w tego typu urządzenia, a więc tym samym podłączone do Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego. Pozostanie również nadwyżka kilku autokomputerów, które będą mogły być wykorzystane jako urządzenia rezerwowe.

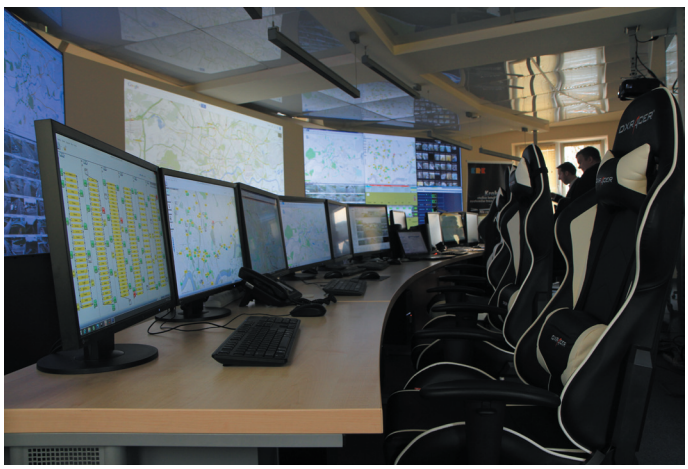
System do analizy i raportowania danych statystycznych

Kolejnym elementem zrealizowanym w ramach projektu było uruchomienie oprogramowania Business Intelligence, służącego do analizy i raportowania danych statystycznych pochodzących z systemu TTSS (fot.2).

W dotychczasowej wersji oprogramowania dyspozytorskiego, wdrożonego w chwili budowy Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego, istniała możliwość kontroli odchyleń od punktualnej realizacji rozkładów jazdy poszczególnych kursów lub linii na przestrzeni określonego i niestety ograniczonego czasu. Rozwiązanie to było wystarczające do kontroli punktowych w krótkim okresie czasu. Brakowało jednak narzędzia do prowadzenia analiz na podstawie kursów wielu linii z dłuższego okresu czasu. W tym celu zdecydowano się na wdrożenie modułu do analizy i raportowania danych statystycznych.

Oprogramowania Business Intelligence pozwala właściwie na dowolną analizę posiadanych danych, zbieranych nieustannie przez system TTSS. Możliwy jest wybór badanego odcinka, przedziału czasowego, całych linii, a nawet konkretnych wariantów linii, rodzaju taboru itp. Wykonawca oprogramowania przygotował szereg raportów, wśród których występują między innymi: odchylenie od rozkładu jazdy, czas przejazdu pomiędzy przystankami, czas postoju na przystankach czy interwały pomiędzy poszczególnymi kursami.

Raporty generowane są zarówno w postaci tabel, jak i wykresów. Określane są wartości minimalne, maksymalne, średnia, mediana czy odchylenie standardowe. Możliwe jest również stworzenie własnych raportów.



Fot. 2. Widok centrum dyspozytorskiego. Fot. Michał Wojtaszek

Narzędzie to może służyć zarówno do lokalizacji odcinków sieci tramwajowej, na których generowane są opóźnienia w stosunku do planowanego rozkładu jazdy, a w konsekwencji do korekty rozkładów jazdy, jak i kontroli działania samego oprogramowania systemu TTSS, na przykład sprawdzenia zmierzonych odległości pomiędzy przystankami.

Dynamiczne trasowanie

Gdy tablice Dynamicznej Informacji Pasażerskiej zainstalowane były tylko na przystankach linii tramwajowej numer 50, znacznie łatwiej można było zachować kontrolę nad informacjami prezentowanymi na poszczególnych wyświetlaczach. Wraz ze zwiększaniem się liczby tego typu urządzeń na przystankach w Krakowie rosły również oczekiwania pasażerów dotyczące funkcjonowania całego systemu. Podstawowy problem stanowi prezentacja danych o przyjazdach w momencie wystąpienia utrudnień na trasie lub całkowitego zablokowania przejazdu na danym odcinku. Wówczas tramwaje nie jadą lub kierowane są na trasę objazdową, a na przystankach pozostają zdezorientowani pasażerowie obserwujący na tablicy wyświetlana informację, że tramwaj przyjedzie za minutę. Oczywiście możliwe jest wyłączenie konkretnych odjazdów na tablicach, a także umieszczenie ręcznie komunikatu o występujących utrudnieniach w ruchu. Nie zawsze jednak jest czas i możliwości, aby to uczynić. Pomocą w takich przypadkach służyć ma dynamiczne trasowanie, czyli kolejny nowy element, który pojawił się w ramach rozwoju Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego (TTSS).

Operator systemu otrzyma narzędzie, za pomocą którego w szybki sposób będzie mógł umieścić na określonej liczbie tablic informację o zmianie trasy danej linii. Rozwiązanie w zależności od sytuacji i wybranego scenariusza automatycznie usunie z tablic na wyłączonym odcinku informację o braku realizacji kursów, natomiast na nowej trasie umieści planowane godziny odjazdów danej linii. Dodatkowo na nowej trasie objazdowej zachowany ma być priorytet dla tramwajów na sygnalizacjach świetlnych.

Wykonawca systemu TTSS zaproponował dwa rozwiązania dynamicznego trasowania: planowane i dynamiczne. W pierwszej wersji informacje o trasie objazdowej przygotowywane są wcześniej przez operatora systemu i po wybraniu odpowiedniego scenariusza mogą być od razu zastosowane. W przypadku wersji dynamicznej dyspozytor w momencie tworzenia objazdu musi samodzielnie zdefiniować objazd. Scenariusz stworzony dynamicznie może jednak zostać zachowany i po uzupełnieniu niezbędnych informacji zapisany jako planowany i być wykorzystany przy następnych utrudnieniach w ruchu.

Otwarcie Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego

Jednym z warunków stawianych wykonawcy przy rozbudowie Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego (TTSS) było otwarcie tego systemu zarówno na użytkowników, jak i urządzenia zewnętrzne. W związku z tym zamawiający wymagał przygotowania protokołów, które umożliwią komunikację z innymi systemami informatycznymi, dzięki czemu w najbliższej przyszłości możliwe będzie między innymi:

- udostępnienie w Internecie informacji o najbliższych odjazdach pojazdów komunikacji miejskiej ze wszystkich przystanków;
- przekazanie danych uzyskiwanych przez system TTSS do odbiorców zewnętrznych celem, na przykład, utworzenia wyszukiwarki połączeń uwzględniającej bieżące utrudnienia w ruchu występujące na ulicach miasta;
- przekazywanie danych z systemu TTSS do zewnętrznych urządzeń, na przykład prywatnych tablic DIP umieszczonych w sklepach wielkopowierzchniowych czy restauracjach;
- umożliwienie podłączenia do systemu TTSS pojazdów wyposażonych w autokomputery innych producentów.

Proces otwierania systemu TTSS na zewnętrznych użytkowników i nowe urządzenia jest skomplikowany i wymaga przygotowania środowiska komputerowego, które z jednej strony zapewni odpowiednie bezpieczeństwo i stabilność całego systemu, przy jednoczesnym przygotowaniu odpowiedniej przepustowości dla kanałów przekazujących dane. Jednym z pierwszych elementów otwarcia systemu TTSS będzie udostępnienie w Internecie możliwości sprawdzenia czasu pozostałego do przyjazdu najbliższych pociągów tramwajowych ze wszystkich przystanków. Już sama ta funkcjonalność powinna zrewolucjonizować sposób korzystania przez pasażerów z komunikacji miejskiej.

W tym miejscu warto wspomnieć również o przygotowaniu przez wykonawcę nowego oprogramowania służącego do konwersji danych z programu BusMan, w którym przygotowywane są rozkłady jazdy, do Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego. Nowy interfejs tzw. mostek nie tylko poprawił sam proces transferu danych, ale również umożliwił jego uproszczenie dla operatora systemu.

Dalsze plany rozwoju Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego

Rozbudowa Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego w ramach Projektu Rozwoju Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie dobiega końca, jednak w chwili obecnej znajdujemy się na półmetku działań, których finałem ma być włączenie trakcji autobusowej do wielkiego Systemu Nadzoru Ruchu Pojazdów Komunikacji Miejskiej. W ramach zrealizowanego projektu już poczyniono pierwsze działania mające na celu otwarcie systemu na innych producentów oprogramowania i wyposażenia pojazdów. Najbliższe plany obejmują podjęcie działań zmierzających do podłączenia autobusów firmy Mobilis spółka z o.o. do Systemu. Także krakowskie MPK dysponuje pewną liczbą autobusów wyposażonych w autokomputery. Dzięki temu będzie można podjąć próbę ich włączenia do systemu TTSS. Wszystkie te działania muszą być jednak powiązane z przygotowaniem odpowiedniej infrastruktury technicznej na terenie poszczególnych zajezdni autobusowych. Trzeba również rozpocząć proces przetwarzania danych rozkładów jazdy linii autobusowych do systemu TTSS. Osobną kwestię stanowi również zakup i montaż tablic Dynamicznej Informacji Pasażerskiej na przystankach autobusowych na terenie miasta. Oczywistym jest, że przystanków tych jest znacznie więcej niż tramwajowych. Jednocześnie nie wszędzie występuje potrzeba montażu elektronicznych wyświetlaczy. W dalszej kolejności będzie można rozważać włączenie przystanków zlokalizowanych poza Krakowem.

Podsumowanie

System Nadzoru Ruchu Tramwajowego funkcjonuje w Krakowie od 2008 roku. W ciągu ostatnich lat udało się go rozbudować tak, że na początku 2016 roku swoim zasięgiem obejmuje wszystkie pociągi tramwajowe oraz większość przystanków tramwajowych na terenie miasta. W naszym mieście obecnie funkcjonuje 317 tablic LED i 145 ekranów LCD Dynamicznej Informacji Pasażerskiej, a w przeciągu najbliższych tygodni w użyciu będzie 286 autokomputerów IBISplus.

System ten jest bardzo dobrym narzędziem zarówno do nadzorowania funkcjonowania sieci tramwajowej na obszarze Krakowa, jak i przekazywania dokładnych informacji o czasie przyjazdu tramwajów oraz występujących utrudnieniach pasażerom korzystającym z komunikacji miejskiej, a zwłaszcza oczekującym na przystankach. Najbliższe lata dają nadzieję na dalszą rozbudowę tego systemu, przede wszystkim na trakcję autobusową, również dzięki środkom finansowym pozyskanym z Unii Europejskiej.

Rozbudowa Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego wchodzącego w skład projektu pn. „Rozwoju Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie" współfinansowany jest w ramach Programu Operacyjnego Infrastruktura i Środowisko 2007–2013, działanie: 8.3 „Rozwój inteligentnych systemów transportowych". Całkowita wartość projektu wynosi: 46 149 354 złotych, natomiast wartość dofinansowania: 32 027 840 złotych.

Rozbudowa systemu zarządzania transportem publicznym (TTSS) „Etap I – Rozwój systemu centralnego wraz z dostawą interfejsów do wymiany danych" wynosi: 3 072 270 złotych, natomiast wartość dofinansowania: 2 123 113 złotych.

Rozbudowa systemu zarządzania transportem publicznym (TTSS) „Etap II – Rozbudowa systemu zarządzania transportem publicznym (TTSS)" wynosi: 16 582 744 złotych, natomiast wartość dofinansowania: 11 459 620 złotych.

Literatura

1. Gryga Ł., Wojtaszek M., Firlejczyk G., *Obszarowy system sterowania ruchem i nadawanie priorytetu dla transportu zbiorowego w Krakowie*, „Transport Miejski i Regionalny", 2013, nr 6.
2. Bruchal I., *Informacja pasażerska w systemie komunikacji miejskiej w Krakowie*, „Transport Miejski i Regionalny", 2013, nr 6.
3. Dokumentacja projektu w zamówieniu: *„Kontrakt na Rozbudowę Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie (TTSS). Etap I – Rozwój systemu centralnego wraz z dostawą interfejsów do wymiany danych"*, Kraków 2005.
4. Dokumentacja projektu w zamówieniu: *„Kontrakt na Rozbudowę Systemu Zarządzania Transportem Publicznym w Krakowie (TTSS). Etap II – Dostawa komputerów pokładowych, tablic informacji pasażerskiej oraz rozbudowa oprogramowania do tworzenia rozkładów jazdy"*, Kraków 2008.

Optymalizacja ruchu drogowego bazująca na symulacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych i obliczeń o wysokiej wydajności[1]

PAWEŁ GORA
mgr, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki Uniwersytetu Warszawskiego, u. Banacha 2, 02-097 Warszawa, tel.: 507 982 292, e-mail: p.gora@mimuw.edu.pl

Streszczenie: Artykuł opisuje pomysł na system zarządzania ruchem pojazdów w dużej skali (np. miasta wielkości Warszawy i większe) bazujący na zastosowaniu symulacji komputerowej w modelu mikroskopowym, metaheurystyk (np. algorytmów genetycznych), obliczeń o wysokiej wydajności i sieci neuronowych. Rozważania teoretyczne sugerują, że system taki może działać lepiej niż systemy zarządzania ruchem istniejące obecnie, a wstępne eksperymenty są obiecujące i pokazują, że warto zbadać dokładniej możliwość stworzenia takiego systemu.

Słowa kluczowe: ruch drogowy, algorytmy genetyczne, optymalizacja

Wprowadzenie

Problem optymalnego zarządzania ruchem drogowym jest bardzo ważny z punktu widzenia gospodarki i efektywnego funkcjonowania współczesnych miast. W stosowanych już obecnie w Polsce i na świecie rozwiązaniach dużą rolę odgrywają nowoczesne technologie ITS. Powstają zaawansowane, zintegrowane systemy zarządzania ruchem, które potrafią działać w trybie adaptacyjnym, zbierają za pomocą detektorów dane o ruchu drogowym, analizują je w czasie rzeczywistym i podejmują odpowiednie działania (np. rekonfiguracja sygnalizacji świetlnych), aby ruch usprawnić. Z perspektywy niniejszego artykułu najistotniejszymi komponentami współczesnych systemów zarządzania ruchem są systemy sterowania sygnalizacją świetlną. Przykładami takich systemów wdrażanych w wielu miastach na świecie są: SCATS ([1]), SCOOT ([2]), RHODES ([3, 4]), OPAC ([5]). Działanie tych systemów bazuje na zbieraniu danych na temat pewnych parametrów ruchu drogowego (np. natężeń ruchu i kolejek przed skrzyżowaniami), przeliczaniu określonych wartości charakteryzujących stan ruchu drogowego (aktualny i, ewentualnie, prognozowany) i odpowiednim dostosowywaniu ustawień sygnalizacji świetlnej (długości cyklu i poszczególnych faz, przesunięć w fazie). Istniejące obecnie systemy mają dużo zalet i potrafią bardzo sprawnie optymalizować ruch. W dalszym ciągu w tym obszarze są jednak możliwości usprawnień, w czym znacznie mogą pomóc zaawansowane metody matematyczne i nowoczesne narzędzia informatyczne.

Stan wiedzy

Celem zaawansowanych systemów zarządzania ruchem (ang. *advanced traffic management systems* – ATMS) jest zapewnienie jak największego poziomu bezpieczeństwa i efektywności ruchu, w tym: zmniejszenia liczby wypadków, czasu podróży, poziomu emisji spalin, zanieczyszczenia środowiska, hałasu. Badania dotyczące takich systemów stanowią stosunkowo młodą dziedzinę nauki, mającą swój początek w drugiej połowie XX wieku; wtedy też problemy kongestii motoryzacyjnej stały się na tyle poważne, że niezbędne stało się opracowanie metod inteligentnego zarządzania tym zjawiskiem. Wtedy również technologia informatyczna stała się na tyle dojrzała, że możliwe stało się jej stosowania na skalę przemysłową w wielu dziedzinach gospodarki, w tym w obszarze transportu. Systemy zarządzania ruchem realizują swój cel m.in. poprzez zbieranie i analizowanie danych na temat ruchu drogowego oraz adaptacyjne sterowanie nim za pomocą różnych dostępnych narzędzi (m.in. sterowanie sygnalizacją świetlną, znaki zmiennej treści, adaptacyjne ograniczenia prędkości i przydziały pasów ruchu).

Detekcja ruchu

Zbieranie danych na temat ruchu drogowego odbywa się zazwyczaj za pomocą zaawansowanych detektorów. We współczesnych systemach zarządzania ruchem dominującą rolę odgrywają pętle indukcyjne i kamery. Detektory te mogą mierzyć natężenie ruchu i średnią prędkość pojazdów przejeżdżających przez dany odcinek w określonej jednostce czasu, często również z podziałem na typ pojazdu (dodatkowo kamery mogą również np. monitorować trasę konkretnych pojazdów, jeśli tylko jest ich dostatecznie dużo). Tego typu pomiary są narażone na błędy, np. wideodetekcja może mieć obniżoną skuteczność w przypadku złych warunków pogodowych, pętle indukcyjne również nie zawsze działają sprawnie [6]. Pętle indukcyjne i kamery nie są również w stanie pozyskiwać informacji o planowanej trasie przejazdu i celach podróży, a takie informacje mogłyby się bardzo przydać do przeprowadzania komputerowych symulacji ruchu i dokładnego prognozowania wartości parametrów ruchu, mających decydujący wpływ na zarządzanie nim (np. czas czekania, opóźnienia, długość kolejek). Informacje te mogą być jednak dostępne w postaci zagregowanej w da-

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016.

nych pomiarowych i danych historycznych, tzn. można zbudować dynamiczne macierze podróży informujące o liczbie przejazdów pomiędzy każdą parą rejonów komunikacyjnych, w tym – z podziałem na trasy. Dodatkowo dalszą trasę i cel podróży konkretnego pojazdu można prognozować, monitorując jego aktualną trasę za pomocą kamer ([7, 8]). Takie dane mogą z kolei posłużyć do wyznaczania relacji skrętnych i lepszego prognozowania wartości kluczowych parametrów ruchu. W efekcie systemy zarządzania ruchem korzystające z takich informacji mogą lepiej prognozować ruch i w konsekwencji – działać skuteczniej. W dalszej części artykułu znajduje się opis sposobu, w jaki predykcję ruchu drogowego (i zarządzanie nim) można będzie jeszcze usprawnić za pomocą lokalizacji GNSS i komunikacji V2I (vehicle-to-infrastructure communication [9]).

Systemy sterowania sygnalizacją świetlną

Jednym z pierwszych profesjonalnych systemów zarządzania był system SCATS. Został opracowany w latach 70. XX wieku, do dziś cieszy się dużą popularnością i jest wdrażany w wielu miastach na świecie. Korzysta z danych pomiarowych (pochodzących np. z pętli indukcyjnych) do obliczania natężeń ruchu i efektywnego wykorzystania zielonego światła, a te wielkości służą do wyznaczania długości cykli i faz. Domyślne plany długości faz i przesunięć w fazie (tzw. offsetów) są predefiniowane dla kilku różnych warunków ruchu drogowego i adaptacyjnie modyfikowane na podstawie danych pomiarowych. Pewną wadą systemu SCATS jest to, że adaptacja korzysta jedynie z aktualnych danych na temat ruchu, nie jest wykonywana żadna predykcja przyszłego ruchu. Algorytm zmiany długości faz, cykli i offsetów korzysta z wyników pomiarów ruchu w kilku poprzednich cyklach, jednak wyniki pomiarów są często nieregularne ([10]), stanowią fluktuujący szereg czasowy, więc takie podejście może nie być optymalne nawet lokalnie (optymalizacja ruchu na 1 skrzyżowaniu), a tym bardziej globalnie na większym obszarze. Dodatkowo koordynacja sterowania pomiędzy skrzyżowaniami jest ograniczona. Dlatego też system ten można w dalszym ciągu usprawnić.

Innym popularnym systemem wywodzącym się z lat 70. XX wieku jest SCOOT ([2]), który powstał na bazie popularnego programu do optymalizacji ustawień sygnalizacji świetlnej TRANSYT ([11]). Oba systemy stosują makroskopowy model ruchu ([12]) do predykcji opóźnień i czasów zatrzymań dla danej konfiguracji sygnalizacji świetlnej (program TRANSYT dokonuje predykcji w trybie offline, na podstawie wprowadzonych natężeń ruchu; system SCOOT pobiera dane pomiarowe i wprowadza je do TRANSYT [12]). Ponieważ model ruchu jest makroskopowy, a pomiary ruchu dotyczą natężeń, SCOOT nie bierze pod uwagę tras przejazdu poszczególnych pojazdów. Jest to więc obszar do dalszych usprawnień systemu i przeprowadzania dokładniejszych predykcji, celem zapobiegania powstawaniu zatorów ruchu.

System RHODES ([3, 4]) ma podobną zasadę działania jak SCOOT i również dokonuje predykcji pewnych parametrów ruchu drogowego, ale w sposób bardziej zaawansowany, na 3 poziomach hierarchii sieci drogowej, korzysta przy tym z dynamicznych macierzy podróży. Dzięki temu jest w stanie przeprowadzać krótkoterminowe (5-minutowy przedział czasu) predykcje relacji skrętnych, co umożliwia dostosowanie ustawień sygnalizacji świetlnej do sytuacji, która może być w ruchu w ciągu najbliższych kilku minut, a nie tylko do sytuacji aktualnej. Dokładność takich predykcji może być jednak na poziomie 20–30% ([3]), a w przypadku krótkoterminowej predykcji ruchu na większym obszarze i w czasie rzędu kilku minut (a właśnie takie predykcje mogą być przydatne z punktu widzenia optymalnego ustawienia sygnalizacji świetlnej), błędy mogą się kumulować i powodować, że predykcje natężeń ruchu, opóźnień i długości kolejek nie będą już wystarczająco dokładne.

Prognozy ruchu stosowane w systemach takich jak SCOOT czy RHODES mogą być potencjalnie ulepszone za pomocą metod predykcji natężeń ruchu i czasów podróży bazujących na algorytmach opracowanych w ramach konkursu dotyczącego predykcji ruchu drogowego [13, 14] lub metod bazujących na sieciach bayessowskich [15]. Metody te mogą umożliwić zarówno dokładniejszą predykcję krótkoterminową (np. 5-minutową, jak w systemie RHODES), jak i predykcję długoterminową (metody opracowywane w ramach konkursu [13] dotyczyły nawet 30-minutowej predykcji parametrów ruchu drogowego). Niektóre z tych metod mogą wymagać danych dotyczących trajektorii jazdy części (np. 1%) uczestników ruchu, których nie da się pozyskać za pomocą pętli indukcyjnych ani kamer (jak wspomniano w rozdziale 2.1., metody wideodetekcji mogą jednak rozpoznawać pojazdy, dzięki czemu można śledzić ich aktualną trasę i prognozować dalszą, podobnie jak w przypadku monitoringu trajektorii [7, 8]), ale potencjalnie można je pozyskiwać za pomocą urządzeń lokalizacyjnych zainstalowanych w pojazdach i komunikacji V2I.

Gorzej może być w sytuacjach nietypowych (np. zamknięta/zablokowana droga, zmiana organizacji ruchu), w których rozkład podróży w sieci drogowej może znacznie odbiegać od normy. Istnieją prace, które zajmują się zagadnieniem makroskopowego modelowania stanu sieci drogowej w takich sytuacjach nietypowych i rozwijane w nich metody, takie jak RH-DTA [16]; potencjalnie mogą znaleźć zastosowanie w nowoczesnych systemach zarządzania ruchem.

Przypuszczalnie bardzo dobrą skuteczność predykcji ruchu mogą mieć również analogiczne metody w modelach wieloagentowych – mikroskopowych lub mezoskopowych, w których każdy uczestnik ruchu (kierowca, a w przyszłości pojazd autonomiczny) traktowany jest jako osobny agent. Przy takim podejściu ruch każdego agenta może być modelowany niezależnie od pozostałych, uwzględniając jednak interakcję między agentami, która również może wpływać na podejmowane przez nich decyzje oraz na stan ruchu (modele makrosopowe i agregacyjne mezoskopowe nie uwzględniają takich interakcji). Modelowanie wieloagentowe może jednak wymagać posiadania profilowanych danych na temat ruchu każdego pojazdu, w szczególności:

informacji o celach podróży i trasach każdego pojazdu, sposobie jazdy.

Mogą one pochodzić bezpośrednio z pojazdu lub być aproksymowane na podstawie danych historycznych, zagregowanych danych aktualnych (pozyskiwanych ze standardowych detektorów: pętli indukcyjnych lub kamer) oraz monitorowanej trajektorii jazdy pojazdu (za pomocą kamer lub urządzeń z systemem lokalizacji, np. GNSS) [7, 8]. Monitorowanie trajektorii jazdy za pomocą kamer może wymagać instalacji dużej ich liczby przy drogach (co może być bardzo kosztowne i narażać prywatność wielu osób) oraz zaawansowanych metod wideodetekcji, które i tak mogą nie mieć idealnej skuteczności w niektórych sytuacjach (np. w trudnych warunkach pogodowych). Monitorowanie trajektorii za pomocą urządzeń lokalizacyjnych wydaje się być znacznie skuteczniejszą metodą, jednak jeżeli będzie możliwe przesyłanie informacji o trajektorii bezpośrednio z pojazdu do systemu zarządzania ruchem, technicznie możliwe będzie również przesyłanie informacji o celu podróży i trasie, zatem ich predykcja nie byłaby potrzebna. Przesyłanie tego typu informacji może się jednak wiązać z problemami dotyczącymi prywatności. Tym niemniej wielu naukowców prognozuje, że w przyszłości wszystkie pojazdy będą monitorowane oraz będą komunikować się z otoczeniem (tzw. komunikacja V2X), dzięki czemu można będzie każdy pojazd traktować w sposób indywidualny, jeszcze skuteczniej prognozować ruch (np. przeprowadzając szybkie symulacje komputerowe) i zarządzać nim [4],

System optymalizacji ruchu drogowego bazujący na symulacji komputerowej

Proponowany przeze mnie system optymalizacji ruchu drogowego nie jest na obecnym etapie zamkniętym systemem ze ściśle określonymi algorytmami i regułami. Stanowi on raczej ogólny schemat, który może być odpowiednio adaptowany w zależności od potrzeb, dostępnych danych i zasobów obliczeniowych.

Podstawowym założeniem proponowanego systemu jest to, że mechanizmy sterowania ruchem drogowym (np. sterowanie sygnalizacją świetlną, proponowanie tras przejazdu, informowanie podróżnych itp.) są testowane w czasie rzeczywistym za pomocą bardzo dokładnych, mikroskopowych symulacji komputerowych rzeczywistego ruchu, kalibrowanych za pomocą danych rzeczywistych pozyskiwanych z detektorów ruchu oraz (przede wszystkim) poprzez komunikację V2I. Symulacje komputerowe w pewnym sensie mają za zadanie prognozować z dużą dokładnością sytuację w ruchu dla wielu możliwych konfiguracji mechanizmów sterowania (np. ustawienia sygnalizacji świetlnych). Przestrzeń możliwych konfiguracji jest najczęściej bardzo duża, np. dla miasta wielkości Warszawy, w którym jest około 800 skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, a sygnalizację na każdym jednym skrzyżowaniu można skonfigurować na wiele sposobów (np. 120 – przy założeniu, że możemy ustawić jedynie całkowitoliczbowe wartości offsetu dla stałej długości cyklu równej 120 sekund i stałych długości faz) jest to 120^{800}. To zbyt dużo, aby przebadać każdą jedną konfigurację; w praktyce nie ma możliwości znalezienia w tak dużej przestrzeni wartości optymalnej za pomocą metod analitycznych z uwagi na złożoność zjawiska ruchu drogowego i jego obliczeniową nieredukowalność ([17]). Oznacza to, że należy bazować na możliwości przebadania jedynie pewnego, stosunkowo niedużego podzbioru całej przestrzeni możliwych rozwiązań, w szczególności należy podjąć decyzję, w jaki sposób tego typu przestrzeń konfiguracji przeszukiwać. Istniejące systemy optymalizacji ruchu zakładają adaptacyjne wprowadzanie z cyklu na cykl jedynie niedużych zmian w aktualnej konfiguracji. Z jednej strony jest to słuszne i bardzo bezpieczne założenie, gdyż nie mając do dyspozycji dużej mocy obliczeniowej i bardzo dokładnych danych dotyczących rzeczywistego ruchu, nie ma sposobu, aby przebadać więcej możliwości i trudno też przewidywać, jakie efekty mogłyby przynieść większe zmiany. Ruch nie zmienia się w sposób bardzo dynamiczny, więc nieduże zmiany w ruchu powinny być dostatecznie obsłużone przez nieduże zmiany w systemie sterowania nim, w tym przypadku – za pomocą rekonfiguracji sygnalizacji świetlnej. Z drugiej strony – może się okazać, że w dłuższej perspektywie takie działanie będzie prowadziło do bardzo nieefektywnych sytuacji w ruchu (duża liczba niedużych lokalnych zmian konfiguracji może powodować duże zmiany globalne, często nieprzewidywalne). Dodatkowo może się okazać, że konfiguracja znacznie odmienna od początkowej może dać istotną poprawę sterowania ruchem, np. w przypadku nagłego wystąpienia sytuacji nietypowych (wypadek). Samo znajdowanie konfiguracji początkowych/bazowych może też wymagać przeszukiwania dużej przestrzeni możliwych rozwiązań w systemach takich jak SCATS czy SCOOT bazowe konfiguracje predefiniują i wprowadzają inżynierowie ruchu, ale wcale nie oznacza to, że są to konfiguracje najbardziej optymalne z punktu widzenia dalszego działania systemu (a w wielu przypadkach mogą prowadzić do bardzo nieefektywnego sterowania ruchem). Dlatego tak czy inaczej trzeba przeszukiwać dużą przestrzeń możliwych konfiguracji sygnalizacji świetlnej bez względu na to, czy będą to robić inżynierowie ruchu, na podstawie swojego doświadczenia i intuicji, czy też wydajne programy komputerowe.

W jaki sposób ocenić, czy dana konfiguracja sygnalizacji świetlnej jest dobra? Można przeprowadzić symulację ruchu dla danej konfiguracji w modelu makro-, mezo- lub mikroskopowym i w tej symulacji przeliczyć wielkości charakteryzujące jakość danej konfiguracji (np. czas przejazdu, opóźnienia, długość kolejek, czas czekania itp.). Symulacja w modelu mikroskopowym może być najbardziej dokładna i można ją przeprowadzić, bazując jedynie na wartościach makroskopowych (np. natężenia ruchu, dynamiczne macierze podróży), jednak przypuszczalnie najdokładniejszych wyników można spodziewać się w sytuacji, gdy model mikroskopowy będzie kalibrowany i inicjowany za pomocą danych na temat położeń, prędkości, celów podróży i tras przejazdu, pozyskiwanych bezpośrednio z pojazdów. Wymagać to będzie dużej

ilości danych pozyskiwanych bezpośrednio z pojazdów, z czym mogą wiązać się pewne trudności:

- problemy techniczne – system zarządzania ruchem będzie musiał w każdej sekundzie zbierać i przetwarzać duże ilości danych na temat rzeczywistego ruchu;
- problemy prawne – zbierane dane mogą być postrzegane jako dane wrażliwe, uczestnicy ruchu mogą nie życzyć sobie, aby te dane były przesyłane do systemu zarządzania ruchem.

Problemy techniczne wydają się być istotne, ale jednak możliwe do rozwiązania w dobie współczesnej techniki informatycznej. Ze względu na typ zagadnienia można je podzielić na trzy kategorie:

- pozyskiwanie danych,
- przesyłanie danych do systemu zarządzania ruchem,
- przetwarzanie danych przez system zarządzania ruchem.

Pozyskiwanie danych

Wszystkie potrzebne informacje mogą być zbierane i wstępnie przetwarzane przez pojazd. Chwilowe położenie, prędkość i przyspieszenie pojazdu mogą być wyznaczane poprzez urządzenia służące do lokalizacji, np. za pomocą systemów nawigacji satelitarnej GNSS ([18]). Tego typu systemy lokalizacyjne posiadają już obecnie bardzo dużą dokładność (nawet do kilku centymetrów, [19]), a w razie potrzeby mogą być wsparte lokalizacją za pomocą urządzeń zamontowanych przy drogach (ponownie zastosowanie może mieć komunikacja V2I i I2V). Również informacje na temat trasy przejazdu będą już niebawem standardową wiedzą posiadaną przez komputery pokładowe w pojazdach. Już dziś wielu kierowców korzysta z systemów nawigacji samochodowej, wprowadza do nich informacje o celu swojej podróży, a system taki znajduje kilka odpowiednich tras i przekazuje je do wyboru użytkownikowi. W przyszłości, w dobie pojazdów autonomicznych, przekazywanie informacji o celu i trasie podróży będzie absolutnym standardem, komputery pokładowe będą musiały wiedzieć, w jaki sposób mają sterować pojazdem przynajmniej w ciągu najbliższych kilku, kilkunastu sekund. Jest więc naturalne, że pasażerowie pojazdu autonomicznego będą przekazywać informacje o celu i wybranej trasie podróży, gdy tylko się na nie zdecydują, w związku z tym komputery pokładowe w pojazdach będą takie informacje posiadać.

Przesyłanie danych do systemu zarządzania ruchem

Przekazywanie danych z pojazdu do systemu zarządzania ruchem może odbywać się poprzez urządzenia realizujące komunikację pojazd-infrastruktura V2I, niepotrzebne mogą być więc jakiekolwiek inne systemy detekcji. Tego typu komunikacja (a także I2V – infrastructure-to-vehicle oraz V2V – vehicle-to-vehicle) w przyszłości będzie w wyposażeniu wszystkich aut poruszających się po drogach; od lat powstają standardy takiej komunikacji oraz protokoły i urządzenia realizujące te standardy ([20, 21]).

Informacje na temat celu podróży i trasy przejazdu będę mogły zostać przekazane do systemu zarządzania ruchem na początku jazdy, gdy tylko podróżni podejmą odpowiednie decyzje. Informacje te będą mogły zostać później uaktualnione, jeśli w trakcie jazdy zajdzie potrzeba, aby zmienić trasę. Przekazanie pojedynczej trasy w praktyce najczęściej będzie sprowadzało się do podania maksymalnie kilkudziesięciu/kilkuset punktów pośrednich, które jednoznacznie będą wyznaczać wybraną trasę, rzadko będzie się zdarzało, aby liczba potrzebnych punktów była większa; praktycznie zawsze rozmiar transferowanej wiadomości nie powinien być większy niż 1 megabajt. Biorąc pod uwagę, że każdy pojazd będzie przekazywał informacje o trasie przejazdu do systemu zarządzania ruchem najwyżej kilka razy w trakcie jazdy, transfer takich danych nie powinien stanowić problemu technicznego.

Pewnym problemem może być natomiast zbieranie informacji o położeniach, prędkości i przyspieszeniu pojazdu (w pewnym sensie wystarczy przekazywać informacje o położeniu, gdyż chwilowa prędkość i przyspieszenie mogą być aproksymowane na podstawie odczytów kolejnych położeń). W celu zapewnienia pełnych i wiarygodnych informacji o ruchu, powinny być one zbierane z odpowiednią częstotliwością, idealnie gdyby można było je przekazywać do systemu zarządzania ruchem co najmniej raz na sekundę, choć w niektórych przypadkach może wystarczyć mniejsza rozdzielczość (np. raz na 5 sekund). W przypadku dużego miasta, w którym w godzinie szczytu może podróżować ponad 100 tysięcy pojazdów, oznacza to w praktyce przesyłanie w każdej sekundzie co najmniej kilku megabajtów danych. Przy odpowiednio zaprojektowanej infrastrukturze służącej do przesyłania danych (np. stacje pośrednie zlokalizowane przy głównych drogach i skrzyżowaniach, zbierające dane od pojazdów znajdujących się w pobliżu) powinno być to jednak technicznie wykonalne.

Przetwarzanie danych przez system zarządzania ruchem

Z uwagi na duży rozmiar danych zbieranych przez system zarządzania ruchem ważnym zagadnieniem staje się ich przetwarzanie, przechowywanie i analiza. W przetwarzaniu danych związanych z lokalizacjami pojazdów przydatne mogą być narzędzia dedykowane dla dużych danych (ang. Big Data), np. Apache Spark ([22]). Narzędzia te są w stanie w bardzo sprawny i dobrze zorganizowany sposób rozpraszać obliczenia związane z przetwarzaniem dużych zbiorów danych na klaster obliczeniowy, korzystając m.in. z paradygmatu MapReduce ([23]). Tego typu podejścia sprawdziły się już w wielu zastosowaniach związanych z przetwarzaniem dużych zbiorów danych.

Problemy prawne

Poza problemami technicznymi związanymi z pobieraniem dużych ilości danych lokalizacyjnych z pojazdów w czasie rzeczywistym, pozostają jeszcze problemy prawne i etyczne związane z przetwarzaniem tego typu danych. Nie każdy bowiem może sobie życzyć, aby dane na temat jego lokalizacji, trasy i celu podróży były udostępniane do systemu

zarządzania ruchem. Częściowo problem może zostać rozwiązany w sytuacji, gdy dane dotyczące lokalizacji pojazdu nie będą mogły zostać bezpośrednio powiązane z danym pojazdem ani z osobami, które w tym pojeździe są (z punktu widzenia systemu zarządzania ruchem informacje te nie mają żadnego znaczenia i nie muszą być przesyłane, przydatny może być jedynie typ pojazdu oraz pewne jego parametry). Dodatkowo podróżni mogą być bardziej skłonni do dzielenia się informacjami na temat swojej lokalizacji i celu podróży, jeżeli będą mieli z tego powodu wyraźne korzyści. Bezpieczny i efektywny przejazd jest jedną z takich korzyści, kolejne to m.in. możliwość rekomendacji parkingów, atrakcji turystycznych, lokali gastronomicznych przy trasie i w pobliżu miejsca docelowego (połączona z możliwością rezerwacji miejsc parkingowych), możliwość automatycznego powiadamiania odpowiednich służb w przypadku wykrycia na podstawie danych lokalizacyjnych awarii/wypadku, możliwość redukcji składki na ubezpieczenie samochodowe w przypadku bezpiecznej jazdy, możliwość otrzymania zniżek na paliwo i komunikację publiczną w zamian za przekazywanie danych na temat swojej lokalizacji. Nawet dane od kilku do kilkunastu procent uczestników ruchu mogą dać wystarczające informacje na temat czasów przejazdu, te informacje z kolei mogą służyć do aproksymacji liczby pojazdów, które przejeżdżają przez dany odcinek, np. na podstawie diagramu fundamentalnego zależności pomiędzy przepływem/liczbą pojazdów a czasem przejazdu ([24]).

Dodatkowo możliwości pojawią się wraz z nadejściem ery pojazdów autonomicznych i upowszechnieniem się modelu *Mobility on demand* [25]. Mieszkańcy miast mogą przestać posiadać pojazdy (przestanie być to opłacalne, z uwagi na ich cenę oraz koszty utrzymania), a zaczną je zamawiać w razie potrzeby, na podobnych zasadach jak obecnie taksówki (ale znacznie taniej, gdyż znikną koszty związane z kierowcą). Wtedy też nie będzie problemu z tym, że do systemu zarządzania ruchem przesyłane są dane, które mogą identyfikować pojazd, jeśli nie będzie mógł on być zidentyfikowany z użytkownikiem.

Innym rozwiązaniem może być metoda *differential privacy* [26], w której celowo dodawany jest szum do danych, zachowując jednocześnie prywatność użytkownika, jak i dokładność danych zagregowanych. W przyszłości mogą pojawić się podobne matematyczne metody zapewniające zachowanie prywatności użytkownika oraz wystarczającą dokładność zbieranych od niego danych i przeprowadzanych obliczeń.

Optymalizacja ruchu drogowego

Zakładając, że system zarządzania ruchem w każdej chwili posiada informacje o położeniu, prędkości i trasie (aktualnej i planowanej) każdego pojazdu uczestniczącego w ruchu (lub od dostatecznie dużej liczby pojazdów, aby przeprowadzać wiarygodne, dokładne mikroskopowe symulacje ruchu), pozostaje wciąż pytanie, w jaki sposób przeszukiwać przestrzeń możliwych konfiguracji sygnalizacji świetlnych, aby znaleźć te, które rzeczywiście mogą być najlepsze i nie doprowadzą do powstania niepożądanych stanów ruchu.

Z pomocą mogą przyjść metaheurystyki, czyli algorytmy opisujące sposób przeszukiwania przestrzeni możliwych rozwiązań, aby znaleźć właściwe (akceptowalne) rozwiązanie danego problemu. Przykładami mogą być tu m.in. algorytmy genetyczne ([27]), metody Monte Carlo ([28]), algorytm Metropolis-Hastings ([29]). Wszystkie te metody w praktyce działają tym lepiej, im więcej konfiguracji z przestrzeni przeszukiwań są w stanie przetestować. Ponieważ test pojedynczej konfiguracji wymaga uruchomienia symulacji komputerowej z odpowiednio dobranymi parametrami, okazuje się, że skuteczność metaheurystyk może zależeć od posiadanej mocy obliczeniowej. Moc obliczeniowa jest skończona, a na dodatek w przypadku sterowania ruchem online (np. adaptacja do sytuacji, w której był wypadek i zablokowana jest droga) jest pożądane, aby algorytmy znalazły dobre rozwiązania na tyle szybko, aby dało się je zastosować.

Do tego celu mogą przydać się obliczenia w klastrach o wysokiej wydajności (ang. HPC – *high-performance computing*, [30]). Tego typu klastry posiadają wiele węzłów obliczeniowych, procesorów i rdzeni, znacznie większą pamięć i pojemność dyskową niż standardowe komputery. Ich moc obliczeniowa mierzona jest we FLOPS-ach (FLOPS – floating point operations per second – liczba operacji zmiennoprzecinkowych na sekundę) i w przypadku najpotężniejszych obecnie superkomputerów może sięgać kilkudziesięciu petaFLOPS ([31]). Komputery takie są jednak bardzo drogie i mogą pojawiać się problemy związane z ich utrzymaniem (awaria węzłów itp.), dlatego w przyszłości dobrym rozwiązaniem może być przeprowadzanie niezbędnych obliczeń na wirtualnych klastrach, w chmurach obliczeniowych (np. Microsoft Azure [32] lub Amazon EC2 [33]). Dodatkowo, przydatne mogą być specjalistyczne narzędzia do przetwarzania dużych zbiorów danych w klastrach, np. wspomniana już platforma Apache Spark [22].

Istotą proponowanego systemu zarządzania ruchem będą jednak algorytmy przeszukiwania przestrzeni możliwych konfiguracji sygnalizacji świetlnej oraz obliczania jakości danej konfiguracji. W tym pierwszym przypadku testowałem dotychczas algorytm genetyczny, który miał za zadania znaleźć suboptymalne konfiguracje sygnalizacji świetlnych na mapie Warszawy, dla dwóch wybranych obszarów: cała sieć drogowa w Warszawie orz mniejszy obszar odpowiadający fragmentowi Starej Ochoty (15 skrzyżowań ze światłami).

Dotychczasowe wyniki są bardzo obiecujące i opisane szczegółowo w pracach [34, 35]. Obecnie pracuję nad przyspieszeniem przeprowadzanych obliczeń poprzez wprowadzenie kolejnego poziomu zrównoleglenia oraz zastosowanie platformy Apache Spark, testuję również metody Monte Carlo.

W przypadku obliczania jakości konfiguracji sygnalizacji świetlnej trwają prace nad metodami, które pozwolą zmniejszyć do minimum liczbę potrzebnych symulacji komputerowych. Autor bada między inni zastosowanie sztucznych sieci neuronowych do aproksymowania wartości funkcji oceny jakości konfiguracji sygnalizacji świetlnej. W takim przypadku mikroskopowe symulacje komputerowe mogą być potrzebne, aby przeprowadzić bardzo dokładne obliczenia funkcji oceny dla pewnego podzbioru konfiguracji (obecnie

jest to około 100 000 konfiguracji), które będą stanowiły zbiór treningowy dla sieci neuronowej. Wstępne eksperymenty pokazują, że to już wystarcza, aby przybliżać wartość funkcji oceny z bardzo dobrą dokładnością (rzędu 1%), ale wyniki muszą jeszcze zostać potwierdzone. W przypadku powodzenia będzie to oznaczało, że wystarczy przeprowadzać mikroskopowe symulacje ruchu dla około 100 000 losowo wybranych konfiguracji sygnalizacji świetlnej, a następnie wytrenować sieć neuronową (lub, potencjalnie, inny algorytm uczenia maszynowego), która będzie potrafiła aproksymować wartość funkcji oceny jakości konfiguracji sygnalizacji świetlnej z bardzo dobrą dokładnością, bez przeprowadzania symulacji komputerowych, a więc również bardzo szybko (czas rzędu milisekund). Oznacza to, że mając do dyspozycji odpowiednio dużą moc obliczeniową (klaster HPC lub np. chmura obliczeniowa), będzie można testować jednocześnie znacznie więcej konfiguracji niż w przypadku przeprowadzania jedynie symulacji komputerowej. Dodatkowo, jeżeli wspomniana sieć neuronowa będzie mogła zostać wytrenowana w trybie offline (np. na podstawie typowej macierzy podróży), a potem wydajnie modyfikowana w zależności od zaistniałej w ruchu drogowym sytuacji, to metody te mogą znaleźć zastosowanie w adaptacyjnym sterowaniu sygnalizacją świetlną i działać w czasie rzeczywistym. Będą w stanie sprawdzić znacznie więcej konfiguracji sygnalizacji świetlnej i szacować ich jakość dokładniej niż istniejące obecnie systemy zarządzania ruchem.

Zaprezentowany system może sprawdzać się szczególnie dobrze w sytuacjach nietypowych (np. wyłączenie z ruchu głównej drogi), które mogą istotnie zmienić charakterystykę ruchu w mieście (zmiany nie będą jedynie niedużą fluktuacją), a także w przypadku dużego udziału w ruchu pojazdów autonomicznych i komunikujących się.

Literatura

1. Sidney Coordinated Adaptive Traffic System, http://www.scats.com.au.
2. Split, Cycle Offset Optimization Technique http://www.scoot-utc.com.
3. Real-time Hierarchical Optimizing Distributed Effective System, http://www.signalsystems.org.vt.edu/documents/Jan2001AnnualMeeting/PituMirchandaniRHODES_TRB2001.pdf
4. Mirchandani P., *RHODES and Next Generation RHODES*, Panel ITS Meeting, 2011, http://goo.gl/ykYqpE .
5. Gartner N.H., Pooran F.J., Andrews C.M., *Implementation of the OPAC adaptive control strategy in a traffic signal network*, IEEE Xplore Conference: Intelligent Transportation Systems, 2001. Proceedings. 2001 IEEE.
6. Problemy związane z pętlami indukcyjnymi: http://gazetaolsztynska.pl/Korkuja-miasto--bo-nie-potrafia-wjechac-na-petle-indukcyjne,70458 .
7. Krumm J., *A Markov Model for Driver turn prediction*, SAE (Society of Automotive Engineers), 2008 World Congress, April 14-17, 2008, Detroit, MIUSA. Paper Number 2008-01-0195.
8. Xue A.Y., Zhang R., Zheng Y., Xie X., Huang J., Xu Z., *Destination Prediction by Sub Trajectory Synthesis and Privacy Protection Against Such Prediction*, in IEEE International Conference on Data Engineering.
9. Komunikacja V2I, Vehicle-to-infrastructure, rozwiązania proponowane przez Kapsch, https://www.kapsch.net/ca/ktc/its-solutions/V2X-Cooperative-Systems .
10. Pascale A., Hoang T.L., Nair R., Characterization *of network traffic processes under adaptive traffic control systems*, in "Transportation Research Part C: Emerging Technologies", vol. 59, 2015.
11. Program TRANSYT https://trlsoftware.co.uk/products/junction_signal_design/transyt .
12. Jaworski, P., *Cloud computing based adaptive traffic control and managemen*t, PhD Thesis. Coventry: Coventry University in collaboration with MIRA Ltd, 2013.
13. IEEE ICDM Contest: TomTom Traffic Prediction for Intelligent GPS Navigation, http://tunedit.org/challenge/IEEE-ICDM-2010 .
14. Gora P., Son H. Nguyen, Szczuka M., Swietlicka J., Wojnarski M., Zeinalipour D., „IEEE ICDM 2010 Contest TomTom Traffic Prediction for Intelligent GPS Navigation", w „IEEE ICDM 2010 Workshops", 2010.
15. Adamczyk M., Betliński P., Gora P., *Combined Bayesian Networks and Rough-Granular Approaches for Discovery of Process Models Based on Vehicular Traffic Simulation*, "Communications in Computer and Information Science", 2010, Volume 80, Part 2.
16. Kucharski R., *Rerouting phenomena modelling for unexpected events in Dynamic Traffic Assignment*, PhD Thesis, Cracow University of Technology, 2015.
17. Wolfram S., *A New Kind of Science*, Wolfram Media, Inc., 2002.
18. GNNS, Global Navigation Satellite System, http://searchnetworking.techtarget.com/definition/GNSS .
19. http://www.navtechgps.com/novatel_rtknav .
20. Dedicated short range communication, http://www.its.dot.gov/DSRC/dsrc_faq.htm.
21. Kenney J.B., *Dedicated Short-Range Communications (DSRC) Standards in the United States*, PROCEEDINGS OF THE IEEE 99(7).
22. Apache Spark – strona oficjalna, http://spark.apache.org .
23. Dean J., Ghemawat S., *MapReduce: simplified data processing on large clusters*, "Communications of the ACM", Vol. 51, Issue 1, 2008.
24. *75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory*, "Transportation Research Circular No. E-C149", 2011.
25. Pavone M., *Autonomous Mobility-on-Demand Systems for Future Urban Mobility*, "Autonomes Fahren", 2015.
26. Dwork C., McSherry F., Nissim K., Smith A., *Calibrating Noise to Sensitivity in Private Data Analysis*, "Theory of Cryptography", Vol. 3876, Lecture Notes in Computer Science, 2006.
27. Mitchell M., *An Introduction to Genetic Algorithms*, MIT Press Cambridge, MA, USA, 1996.
28. Metropolis N., *The beginning of the Monte Carlo method*, Los Alamos Science, 1987.
29. Hastings W.K., *Monte Carlo Sampling Methods Using Markov Chains and Their Applications*, Biometrika 57 (1).
30. High-Performance Computing, HPC, http://insidehpc.com/hpc-basic-training/what-is-hpc
31. Lista najpotężniejszych superkomputerów, http://www.top500.org/statistics/sublist
32. Microsoft Azure: https://azure.microsoft.com .
33. Amazon EC2, https://aws.amazon.com/ec2 .
34. Gora P., Pardel P., *Application of Genetic Algorithms and High-Performance Computing to the Traffic Signal Setting Problem, Concurrency, Specification & Programming 1*, 2015.
35. Gora P., *A genetic algorithm approach to optimization of vehicular traffic in cities by means of configuring traffic lights*, "Emerging Intelligent Technologies in Industry", 2011.

Architektura informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy[1]

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

Streszczenie: Artykuł przedstawia architekturę systemu informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy transportu zbiorowego, stworzoną w oparciu o metodologię FRAME. Podczas tworzenia architektury logicznej wykazano, że dostępne elementy architektury FRAME nie obejmują koncepcyjnie realizacji zadań powierzonych projektowanemu systemowi. W celu utworzenia architektury zaproponowano dodanie nowych potrzeb użytkownika, funkcji i przepływów. Artykuł przedstawia wszystkie elementy zaprojektowanej architektury. Dodatkowo zostały w nim zaprezentowane sposoby realizacji architektury w formie architektury fizycznej i organizacyjnej.
Słowa kluczowe: priorytet transportu zbiorowego, informacja dla kierowców, interfejs człowiek-maszyna

Wprowadzenie

Stosowanie priorytetów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną dla pojazdów transportu zbiorowego wiąże się z pewnymi utrudnieniami dla innych użytkowników ruchu. Dodatkowo priorytetowy sygnał umożliwiający przejazd pojazdom transportu zbiorowego przez skrzyżowanie jest nadawany tylko na określony czas, stąd w przypadku zbyt wolnej jazdy pojazdu, nie będzie on w stanie zdążyć na swoją fazę (która i tak zostanie wydłużona do maksimum, przez co będzie zwiększać utrudnienia dla pojazdów indywidualnych). W przypadku zbyt szybkiej jazdy może dojść do wymuszenia zatrzymania spowodowanego nieprzygotowaniem przez system sterowania ruchem fazy priorytetowej na czas.

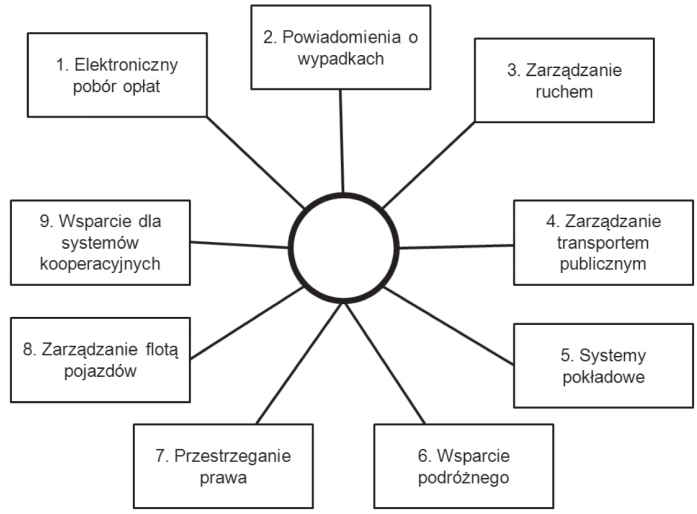
Podstawowym celem artykułu jest przedstawienie zastosowania architektury FRAME do stworzenia architektury informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy transportu zbiorowego w miastach. Informacja ta umożliwiałaby odpowiednie dostosowanie prędkości pojazdu do programu sygnalizacyjnego, przez co można by osiągnąć pewne korzyści (zarówno dla transportu zbiorowego, jak i pojazdów indywidualnych).

Architektura FRAME

Architektura FRAME jest Europejską Ramową Architekturą ITS, będącą rezultatem projektu KAREN (zrealizowanego w roku 2000 w ramach V Programu Ramowego Komisji Europejskiej). Stosowanie architektur FRAME umożliwia systematyczne planowanie aplikacji inteligentnych systemów transportowych (ITS) i zapewnia kompatybilność rozwiązań tworzonych wedle tej metody. Od momentu stworzenia architektury została ona wykorzystana z sukcesem w 9 krajach Unii Europejskiej (m.in. Austrii, Francji czy Finlandii). W Polsce największym projektem ITS wykonanym z wykorzystaniem metodologii FRAME jest krajowy System Zarządzania Ruchem na Drogach Krajowych (SZREK). [1]

Tworzenie architektury aplikacji w metodologii FRAME należy zacząć od określenia potrzeb użytkownika, jakie musi spełniać tworzona aplikacja. Następnie poprzez wybór funkcji zaspokajających wszystkie wybrane potrzeby, wybór przepływów, wykorzystywanych baz danych i aktorów systemu, możliwe jest utworzenie architektury logicznej systemu.

Kolejnym krokiem jest utworzenie architektury fizycznej, w której do stworzonych podsystemów i modułów są przypisywane wcześniej określone elementy architektury logicznej. Dzięki temu tworzona aplikacja będzie w pełni kompatybilna ze wszystkimi innymi systemami ITS tworzonymi zgodnie z metodologią FRAME. Przy tworzeniu obu architektur możliwe jest wykorzystanie dedykowanego do tych celów narzędzia FRAME Selection Tool. Ostatnią tworzoną architekturą według metodologii FRAME jest architektura komunikacyjna, która przedstawia wymagane połączenia między umiejscowieniem elementów opisanych w architekturze fizycznej. Obszary zastosowań metodologii FRAME zostały przedstawione na rysunku 1. [2]



Rys. 1. Obszary zastosowań metodologii FRAME
Źródło: opracowanie własne na podstawie: The FRAME Architecture and The ITS Action Plan

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: J. Aleksandrowicz 50%, M. Piwowarczyk 50%.

Założenia dla projektowane systemu

System informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy transportu zbiorowego byłby w pełni automatyczną aplikacją ITS umożliwiającą zarówno sugerowanie prowadzącym, z jaką prędkością powinni jechać, jak i zbierającą informacje o ruchu wszystkich pojazdów transportu zbiorowego w celu optymalizacji rozkładów jazdy.

Podpowiadanie prowadzącym prędkości z jaką powinni jechać ma na celu zmniejszenie liczby zatrzymań pojazdów transportu zbiorowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną oraz poprawę punktualności przyjazdów na przystanki. Sugerowana prędkość byłaby wyliczana automatycznie na podstawie danych ze sterowników sygnalizacji świetlnej na każdym skrzyżowaniu, do którego zbliżałby się pojazd (głównie na podstawie informacji o czasie, po którym nastąpi przydzielenie priorytetu dla zbliżającego się pojazdu). W przypadku, gdy pomiędzy przystankami nie znajdowałoby się żadne skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną, system na podstawie informacji z bazy danych o rozkładach jazdy i bazy danych informacji o trasie przejazdu pojazdu wyliczałby automatycznie proponowaną prędkość jazdy dla prowadzącego, w celu utrzymania punktualności przejazdu, zmniejszenia czasu opóźnienia lub niwelacji czasu nadspieszenia.

Podsystem odpowiedzialny za optymalizację rozkładów jazdy opierałby się w głównej mierze na informacjach o czasach przejazdu zbieranych na bieżąco i informacjach o sieci transportowej miasta, w którym system by funkcjonował. Zbierane informacje na temat czasów przejazdu na poszczególnych odcinkach sieci, byłyby archiwizowane w specjalnie do tego przystosowanej bazie danych. Głównym zadaniem podsystemu byłoby ocenianie, na podstawie baz danych o sieci transportowej i pomierzonych czasach przejazdu, aktualnych rozkładów jazdy. Ocena polegałaby na sprawdzeniu, czy pojazdy nie jeżdżą zbyt wolno w celu wykonywania rozkładu jazdy lub czy ograniczenia związane z infrastrukturą i organizacją ruchu uniemożliwiają punktualne przyjazdy na przystanki. W przypadku wykazania przez podsystem możliwości poprawy rozkładów jazdy aplikacja automatycznie informowałaby o tym jednostki odpowiedzialne za tworzenie rozkładów jazdy.

Trudności przy tworzeniu architektury logicznej

Przy tworzeniu architektury logicznej systemu informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy transportu zbiorowego skorzystano z narzędzia FRAME Selection Tool. Już na samym początku określania potrzeb użytkownika udało się wykazać, że dostępne elementy architektury FRAME nie obejmują koncepcyjnie realizacji zadań powierzonych projektowanemu systemowi. Stało się to powodem do rozpoczęcia prac mających na celu utworzenie nowych elementów metodologii FRAME. Stworzone elementy wraz z już istniejącymi w metodologii, umożliwiły utworzenie poprawnej architektury logicznej.

Nowo utworzone elementy architektury to potrzeby użytkownika, przepływy i jedna funkcja. Dodane elementy zostały zdefiniowane w sposób taki sam jak wszystkie już istniejące elementy metodologii. Do nowo powstałych potrzeb użytkownika należy zaliczyć potrzeby:

- system będzie w stanie obliczać optymalne parametry jazdy pojazdu transportu zbiorowego dla zadanych ograniczeń,
- system będzie zapewniał automatyczną wymianę danych pomiędzy centrami sterowania a dyspozytorniami przewoźnika,
- system będzie w stanie zbierać informacje na temat czasów przejazdu i automatycznie w oparciu o sprzężenie zwrotne proponować zmiany w rozkładach jazdy.

Zaproponowana nowa funkcja miałaby za zadanie wyliczanie odpowiednich parametrów jazdy dla pojazdu transportu zbiorowego w celu bezkolizyjnego przejazdu przez najbliższe skrzyżowanie lub punktualny przyjazd na najbliższy przystanek. Nowa funkcja byłaby połączona z resztą architektury (m.in. bazami danych zawierającymi informacje o programach sygnalizacji świetlnych czy funkcjami odpowiedzialnymi za przekazywanie informacji prowadzącemu pojazd) za pomocą nowych przepływów danych.

Architektura fizyczna

Stworzona architektura logiczna stała się podstawą do przygotowania architektury fizycznej. W tym celu stworzono sześć modułów:

- główna dyspozytornia,
- pojazd transportu zbiorowego,
- kierowca pojazdu transportu zbiorowego,
- moduł danych o sieci ulicznej i torowej,
- moduł rozkładów jazdy,
- system sygnalizacji świetlnej.

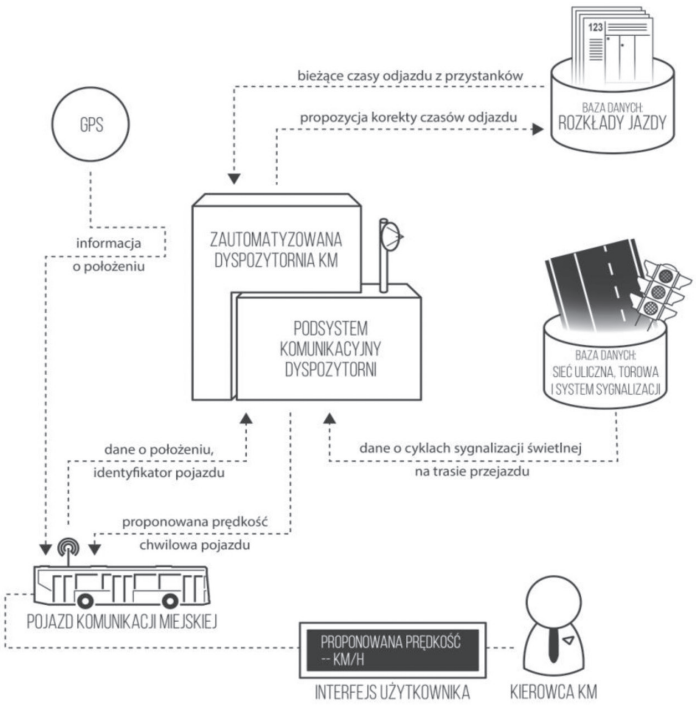
Moduły zostały przypisane do trzech podsystemów, odpowiedzialnego za informowanie prowadzącego pojazd o sugerowanej prędkości, komunikacyjnego dyspozytorni i zajmujący się optymalizacją rozkładów jazdy. Schemat architektury fizycznej został przedstawiony na rysunku 2.

Moduł głównej dyspozytorni odpowiedzialny jest za zbieranie i przekazywanie informacji między modułami. Dyspozytornia pełni także funkcje miejsca, w którym wykonywane są wszystkie niezbędne obliczenia umożliwiające poprawne funkcjonowanie systemu.

Moduł pojazdu transportu zbiorowego jest odpowiedzialny za zbieranie informacji na temat ruchu pojazdu i przekazywanie kierowcy informacji o proponowanej prędkości. Informacja o prędkości jest tylko sugestią systemu dla kierowcy, stąd nie są wykorzystywane w tym module funkcje, które mogłyby wymusić na kierowcy zmianę prędkości.

Moduł kierowcy pojazdu transportu zbiorowego ściśle związany jest z modułem pojazdu. Kierowca na podstawie otrzymanych danych z systemu może, ale nie musi, zmienić prędkość, przez co oddziałuje na moduł pojazdu.

Moduł danych o sieci ulicznej i torowej składa się w głównej mierze z baz danych na temat długości odcinków, organizacji ruchu czy infrastrukturze na poszczególnych odcinkach.



Rys. 2. Schemat architektury fizycznej
Źródło: opracowanie własne

Moduł rozkładów jazdy zawiera w sobie bazę danych z aktualnymi rozkładami jazdy oraz odpowiedzialny jest za zbieranie informacji na temat aktualnych czasów przejazdu, które mogą posłużyć do optymalizacji rozkładów jazdy.

Moduł systemu sterowania ruchem odpowiedzialny jest za zbieranie informacji ze wszystkich objętych systemem sterowników sygnalizacji świetlnej na temat planów sygnalizacyjnych. Moduł ten odpowiada także za przesyłanie informacji do głównej dyspozytorni o czasie, po jakim zostanie nadany priorytet w danej relacji dla zbliżającego się pojazdu.

Praktyczne zastosowanie stworzonej architektury aplikacji ITS

Na podstawie stworzonej architektury systemu informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy transportu zbiorowego możliwe jest stworzenie systemu umożliwiającego spełnianie wszystkich potrzeb przyszłych użytkowników. Odpowiednie zaprogramowanie systemu mogłoby zapewnić zmniejszenie kosztów transportu zbiorowego, skrócić czas przejazdu na części odcinków, a także wpłynąć pozytywnie na transport indywidualny (m.in. poprzez zmniejszenie negatywnego wpływu priorytetów na ruch pojazdów indywidualnych).

Zaprogramowany system powinien się opierać na stosowanych w danym mieście rozwiązaniach, zarówno z dziedziny sterowania sygnalizacją świetlną, detekcji pojazdów, jak i łączności między elementami systemu czy archiwizacji danych. W przypadku detekcji pojazdów architektura systemu wymaga ciągłego śledzenie pojazdu w sieci, co powoduje przymus stosowania takich metod detekcji, które by to zapewniały (np. GPS).

Zastosowanie technologii GPS umożliwia szybką detekcję pojazdu w sieci, jednakże ze względu na możliwe zakłócenia potrzebny jest dodatkowy system detekcji (np. drogą radiową). W przypadku skrzyżowań z sygnalizacją świetlną najlepszym rozwiązaniem dla efektywności pracy systemu byłoby umieszczenie przekaźnika informacji w sterowniku sygnalizacji świetlnej, dzięki czemu od razu po wykryciu pojazdu możliwe byłoby wysłanie informacji do głównej dyspozytorni.

Następnie tuż po przetworzeniu danych i wyliczeniu sugerowanej prędkości informacje byłyby wysyłane do pojazdu, gdzie mogłyby być przekazywane kierowcy w formie głosowej lub tekstowej. Warto zauważyć, że detekcja pojazdu przy zastosowaniu podwójnego systemu detekcji możliwa byłaby tuż po przejechaniu wcześniejszego skrzyżowania lub tuż po opuszczeniu przystanku przez pojazd. Dzięki temu sugerowana prędkość mogłaby być znacznie wcześniej przesłana do kierowcy. Dodatkowym atutem tego rozwiązania byłaby możliwość odpowiedniego kolejkowania pojazdów w węzłach komunikacyjnych poprzez sugerowanie mniejszej prędkości pojazdom nadspieszonym (przy jednoczesnym opóźnieniu wyświetlenia fazy dla tego pojazdu) i większej dla pojazdów opóźnionych (przy jednoczesnym przyspieszeniu wyświetlania się fazy dla tego pojazdu).

Ostatnim praktycznym zastosowaniem stworzonego systemu stałaby się funkcja optymalizacji rozkładów jazdy. Funkcja ta mogłaby być realizowana poprzez komunikaty wysyłane do dyspozytorni informujące o możliwości poprawy rozkładu jazdy. System dodatkowo mógłby być połączony z używanymi programami do układania rozkładów jazdy, dzięki czemu nowe rozkłady jazdy automatycznie uwzględniałyby zaobserwowane przez system zmiany w czasach przejazdu na różnych odcinkach sieci.

Podsumowanie

Proces tworzenia architektury dla systemu informacji o priorytecie dla prowadzących pojazdy transportu zbiorowego umożliwił wykazanie, że Europejska Ramowa Architektura ITS – FRAME nie obejmuje wszystkich możliwych zagadnień z dziedziny systemów ITS. Dzięki zastosowaniu nowych elementów (takich jak przepływy, potrzeby użytkownika czy funkcje) możliwe było stworzenie architektury logicznej i funkcjonalnej dla projektowanego systemu. Aby jednak przystąpić do programowania nowej aplikacji, muszą zostać wykonane wszelkie pomiary, które wykażą, w jaki sposób użycie aplikacji wpłynie na transport zbiorowy oraz czy stosowane do tej pory systemy (m.in. sterowania ruchem, planowania rozkładów jazdy) byłyby kompatybilne z zaprojektowanym rozwiązaniem.

Stworzona architektura umożliwia dostosowanie jej do większości stosowanych obecnie rozwiązań technicznych i informatycznych w taki sposób, aby stworzony na jej podstawie system był możliwie najbardziej efektywny. Dodatkowo warto zauważyć, że wykorzystanie przy projektowaniu metodologii FRAME zapewnia kompatybilność ze wszystkimi systemami i aplikacjami zaprojektowanymi zgodnie z tą metodologią.

Literatura

1. Olszewski P., Kasprzak W., *Wykorzystanie metody FRAME do określenia architektury systemu zarządzania ruchem w warszawskim węźle dróg krajowych,* Polski Kongres ITS, 2015.
2. The FRAME Architecture and The ITS Action Plan, Booklet of the E-FRAME Project, czerwiec 2011.

Sposoby detekcji pojazdów transportu zbiorowego i ich funkcjonalność[1]

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

Streszczenie: Artykuł porusza tematykę detekcji pojazdów transportu zbiorowego w obrębie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną. W artykule zostały przedstawione sposoby wykrywania pojazdów transportu zbiorowego, ich funkcjonalności i przydatność w nowoczesnych systemach sterowania ruchem. W artykule zostały przedstawione m.in. takie rozwiązania jak: detekcja indukcyjna, detekcja radiowa, wideodetekcja czy detekcja na podstawie lokalizacji GPS. Dodatkowo zaproponowano możliwość wykorzystania techniki RFID w detekcji pojazdów transportu zbiorowego.
Słowa kluczowe: transport zbiorowy, priorytet w ruchu, detekcja pojazdów

Wprowadzenie

Obecnie w Polsce udział transportu samochodowego w miastach gwałtownie rośnie, przez co zwiększa się też ryzyko wystąpienia kongestii w ruchu. Aby zapewnić możliwość uprzywilejowania pojazdów transportu zbiorowego na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną, należy stosować system oparty na różnych sposobach detekcji pojazdów. Wśród najczęściej stosowanych rozwiązań warto wymienić detekcję indukcyjną, wideodetekcję oraz detekcję radiową. Każdy ze sposobów detekcji pojazdów ma swoje funkcjonalności, w tym mocne i słabe strony. Obecnie najważniejszymi wymaganiami stawianymi systemom detekcji pojazdów jest prostota wdrożenia, niska cena, odpowiednio wczesna detekcja pojazdu, niezawodność i trwałość elementów systemu i możliwość pomiaru wielu zmiennych.

Detekcja indukcyjna

Detekcja indukcyjna to najpopularniejsza metoda detekcji pojazdów wśród obecnie stosowanych w Polsce. Poprzez zbieranie informacji na temat obecności pojazdów nad pętlą indukcyjną możliwe jest wyznaczanie liczby pojazdów przejeżdżających nad detektorem. Wadą tego rozwiązania jest problem z ustalaniem struktury rodzajowej pojazdów przejeżdżających przez badany przekrój drogi. Dodatkowo pętle indukcyjne nie zapewniają stuprocentowej dokładności pomiaru. [3]

Detekcja pojazdów przy wykorzystaniu pętli indukcyjnych opiera się na zmianie wartości indukcyjności prostokątnej pętli, powodowanej przez pojazd (masę metalu w pojeździe). Podczas przejeżdżania pojazdu lub w przypadku zatrzymania pojazdu nad pętlą indukcyjną dochodzi do zakłócenia pola magnetycznego, które następnie przekształcane jest na binarny sygnał cyfrowy, zapisywany w bazie danych systemu. [3]

Pętle indukcyjne powinno umieszczać się około 2–5 cm pod powierzchnią jezdni. Jednakże, jeżeli w jezdnię wbudowane jest torowisko tramwajowe, pętle indukcyjne powinny być montowane w oddaleniu co najmniej 30 cm od torów tramwajowych. [3]

Pętle indukcyjne są stosowane w obrębie jezdni dla samochodów (fot. 1), jak i w obrębie torowisk tramwajowych (także tych wydzielonych poza jezdnię). Najczęściej pętle indukcyjne w obrębie wydzielonych torowisk tramwajowych można spotkać jako płyty betonowe umieszczone pomiędzy szynami (jak na fot. 2).

Stosowanie pętli indukcyjnych do detekcji pojazdów transportu zbiorowego ma sens wyłącznie w przypadku wydzielonych torowisk tramwajowych lub wydzielonych pasów

Fot. 1. Pętle indukcyjne zlokalizowane w jezdni
Źródło: archiwum autorów

Fot. 2. Pętla indukcyjna na wydzielonym torowisku tramwajowym
Źródło: http://www.transportszynowy.pl/sygpetlad.jpg

[1] ©Transport Miejski i Regionalny, 2016. Wkład autorów w publikację: J. Aleksandrowicz 50%, M. Piwowarczyk 50%.

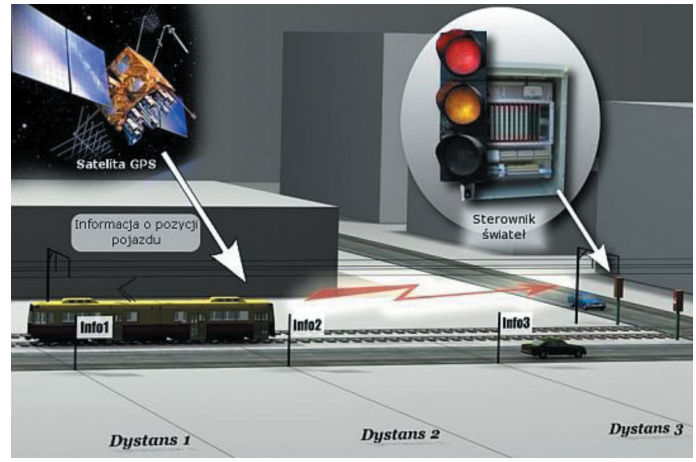
autobusowych i autobusowo-tramwajowych. W każdym innym przypadku pętle indukcyjne będą traktowały pojazd transportu zbiorowego tak, jak każdy inny wykryty pojazd. Za pomocą układu pętli indukcyjnych (jak na fot. 3) możliwe jest nie tylko zbieranie informacji na temat obecności pojazdu, ale także jego prędkości i kierunku jazdy (w przypadku torowisk tramwajowych jednotorowych). Pętle indukcyjne są często wykorzystywane jako rezerwowy system detekcji dla pojazdów transportu zbiorowego (na wypadek awarii podstawowego systemu). [3]

Fot. 3. Układ pętli indukcyjnych na wydzielonym torowisku tramwajowym
Źródło: http://tramwaje.gdanskie.info/data/media/181/pozna_grunwaldzka_jeleniogrska_ptle_indukcyjne.JPG

Detekcja radiowa

Detekcja radiowa pojazdów transportu zbiorowego najczęściej wykorzystywana jest w przypadku tramwajów. Zapewnia ona znacznie większe możliwości niż pętle indukcyjne. Umożliwia przesyłanie wielu informacji z pojazdu zarówno do dyspozytorni ruchu, jak i lokalnych sterowników sygnalizacji świetlnej. Dodatkowo dzięki temu sposobowi detekcji możliwe jest wykrycie nadjeżdżającego pojazdu transportu zbiorowego w gronie innych pojazdów (np. w przypadku autobusów poruszających się po jezdniach bez wydzielonych pasów dla autobusów). Detekcja radiowa zapewnia także możliwość wczesnego wykrycia pojazdu zbliżającego się do sygnalizacji świetlnej bez potrzeby tworzenia dodatkowej infrastruktury w obrębie jezdni lub torowiska (tak jak ma to miejsce w przypadku detekcji indukcyjnej).

W detekcji radiowej pojazd zbliżający się do sygnalizacji świetlnej wysyła jeden lub więcej meldunków o zbliżaniu się do skrzyżowania. Dzięki temu sterowniki sygnalizacji świetlnej mogą odpowiednio dopasować plan sygnalizacyjny tak, aby pojazd mógł bez zatrzymania przejechać przez skrzyżowanie. W zależności od potrzeb użytkownika drogą radiową mogą być wysyłane także inne informacje z pojazdu m.in. jak aktualna prędkość pojazdu, napełnienie lub numer taborowy. Schemat funkcjonowania detekcji radiowej pojazdów transportu zbiorowego został przedstawiony na rysunku 1. [2]



Rys. 1. Schemat detekcji radiowej pojazdów transportu zbiorowego
Źródło: źródło: http://www.infotron.com.pl/images/pl/prior.jpg

Największą wadą detekcji radiowej pojazdów transportu zbiorowego jest przymus wyposażenia pojazdów w odpowiednie urządzenia (autokomputery i anteny radiowe). Wiąże się to z kosztami wdrażania systemu nie tylko po stronie zarządcy infrastruktury, ale także przewoźników. Detekcja radiowa tramwajów stosowana jest obecnie m.in. w Krakowie czy Wrocławiu. [2,3]

Detekcja GPS

Nadawanie priorytetów w sygnalizacji świetlnej dla pojazdów transportu zbiorowego na podstawie lokalnych detektorów nie umożliwia zarządzania całym systemem. Zarówno pętle indukcyjne (informujące wyłącznie o przejeździe jakiegoś pojazdu), jak i detekcja radiowa nie umożliwiają dokładnego zlokalizowania każdego pojazdu w sieci. Tę możliwość zapewnia system lokalizacji satelitarnej GPS. System ten umożliwia dyspozytorni ruchu zlokalizowanie każdego pojazdu w sieci, określenie jego parametrów ruchowych, odchylenia czasu jazdy od czasu rozkładowego oraz identyfikację lokalnych zatorów w sieci. [2]

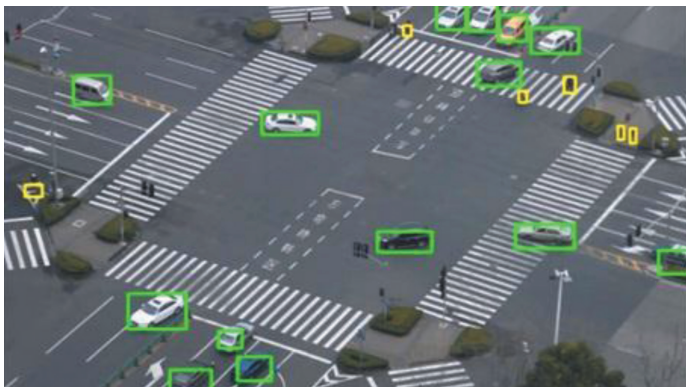
Detekcja na podstawie systemu GPS umożliwia przyznawanie priorytetów w sygnalizacji świetlnej dla pojazdów transportu zbiorowego oraz odpowiednie ich nadawanie w celu zmniejszania czasu opóźnień lub niwelowaniu nadspieszeń. Możliwe jest to m.in. poprzez wyznaczanie odpowiedniej sekwencji nadawania sygnałów uprawniających na przejazd w obrębie węzłów komunikacyjnych m.in. w celu uniknięcia sytuacji, gdy przed pojazd opóźniony wjedzie pojazd nadspieszony (generujący dodatkowe straty czasu dla pojazdu opóźnionego).

Detekcja GPS nie jest jednak idealnym rozwiązaniem, ponieważ na skutek braku sygnału z pojazdu (np. podczas przejazdu tunelem tramwajowym) dyspozytornia traci wszelkie informacje o lokalizacji pojazdu. Stąd warto zauważyć, że detekcja z wykorzystaniem lokalizacji GPS powinna być stosowana jako dodatkowy system, zapewniający prostsze zarządzanie priorytetami dla pojazdów transportu zbiorowego w obrębie węzłów komunikacyjnych, czy system wspierający zarządzanie i nadzór nad taborem w sieci.

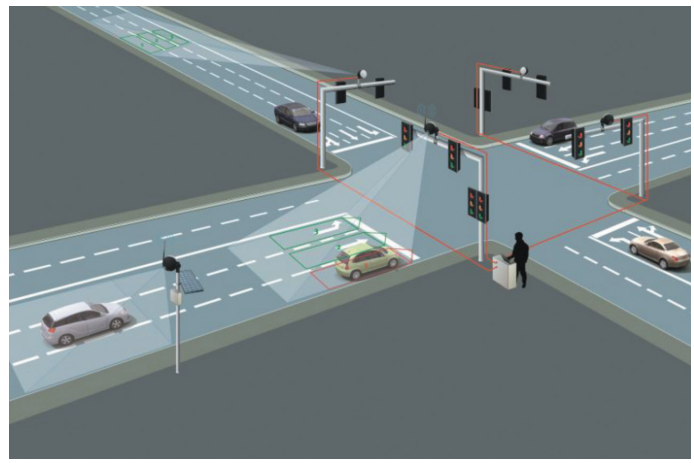
Detekcja wideo

Zastosowanie wideodetekcji umożliwia zbieranie bardzo wielu danych na temat ruchu pojazdów. Możliwe jest nie tylko zbieranie informacji na temat przejazdu pojazdów czy ich prędkości, ale także o strukturze rodzajowej ruchu. Wdrażanie detektorów wideo nie wymusza kosztów u przewoźników (detekcja radiowa, detekcja GPS) oraz nie jest metodą inwazyjną (detekcja indukcyjna). W przeciwieństwie do pozostałych metod umożliwia w czasie rzeczywistym weryfikację danych przez operatora systemu, dzięki czemu możliwe jest szybkie wykrycie usterki w pracy systemu. [1]

Wideodetekcja opiera się na interpretacji obrazów z kamer zlokalizowanych w sieci ulicznej (najczęściej w obrębie skrzyżowań) przez specjalistyczne programy informatyczne. Programy te w zależności od użytych w nich algorytmów zapewniają różne rodzaje detekcji m.in. poprzez wyznaczanie wirtualnych pól pomiarowych (jak na rysunku 2) możliwe jest określanie wielkości pojazdu, czasu przebywania pojazdu w jednym miejscu (np. ile autobus stoi na przystanku), kierunku ruchu, a także możliwe jest wykrywanie pojazdów uprzywilejowanych. [5] W przypadku innych sposobów interpretacji obrazów z kamer możliwa jest detekcja wszystkich użytkowników ruchu, odczytywanie tablic rejestracyjnych czy śledzenie pojazdu w sieci. Dzięki stosowaniu zaawansowanych narzędzi informatycznych możliwe jest uzyskiwanie dużej liczby informacji z detektorów, które są bardziej precyzyjne niż w przypadku innych rodzajów detekcji.[1] Na rysunku 3 został przedstawiony schemat funkcjonowania podstawowego systemu wideodetekcji.



Rys. 2. Wideodetekcja z wykorzystaniem wirtualnych pól pomiarowych
Źródło: http://www.fujitsu.com/cn/en/Images/figer-4_tcm144-1598334.jpg



Rys. 3. Schemat funkcjonowania wideodetekcji
Źródło: http://www.aldridgetrafficcontrollers.com.au/Images/UserUploadedImages/112/Technical_drawing_Grey.jpg

Wideodetekcja w przypadku pojazdów transportu zbiorowego umożliwia rozpoznawanie poszczególnych pojazdów (m.in. poprzez rozpoznawanie tablic rejestracyjnych lub numerów taborowych), dzięki czemu możliwe jest w czasie rzeczywistym sprawdzenie punktualności przyjazdu pojazdu. W przypadku przystanków zlokalizowanych na wlotach skrzyżowań wideodetekcja może być wykorzystana do mierzenia czasu wymiany pasażerskiej, dzięki czemu możliwe jest skrócenie czasu oczekiwania przez pojazd na sygnał uprawniający do przejazdu przez skrzyżowanie.

Dzięki postępowi technologicznemu skuteczność wideodetekcji nie jest obecnie ściśle związana z możliwościami sprzętowymi kamer na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną. Należy jednak unikać lokalizowania kamer w miejscach, gdzie będą narażone na duże drgania lub obraz będzie częściowo zasłonięty przez różne obiekty. Ważne jest także stosowanie odpowiednich przesłon umożliwiających minimalizację wpływu jasnych źródeł światła na wyniki analizy.

Detekcja za pomocą promieniowania optycznego

Detektory promieniowania optycznego mogą opierać swoje działanie o promieniowanie widzialne lub podczerwone. Detektory składają się z nadajnika i odbiornika fali, przy czym możliwe jest, aby nadajnik i odbiornik mógł być umieszczony w jednym urządzeniu. Za pomocą detektorów promieniowania optycznego możliwe jest zbieranie informacji o obecności pojazdu, liczbie przejeżdżających pojazdów, długości pojazdów i obecności pieszych. Detektory tego typu zapewniają większą dokładność pomiaru niż w przypadku detekcji indukcyjnej. [3]

Wadami detektorów promieniowania optycznego są trudności z odróżnianiem typu i kierunku ruchu (w przypadku układu detektorów ten problem nie występuje), wrażliwość na zewnętrzne źródła promieniowania optycznego. Kolejnymi wadami są trwałość detektorów i częsta potrzeba konserwacji urządzeń, jednakże dzięki zastosowaniu technologii LED nowoczesne detektory są bardziej trwałe od swoich poprzedników. [3]

Fot. 4. Nadajnik detektora promieniowania podczerwonego
Źródło: http://www.transportszynowy.pl/nadajnikd.jpg

Fot. 5. Czujnik promieniowania podczerwonego
Źródło: http://www.transportszynowy.pl/czujnik-podcd.jpg

Obecnie detekcja oparta na promieniowaniu podczerwonym wykorzystywana jest w takich miastach jak Kraków, Szczecin czy Wrocław w sterownikach zwrotnic i przy wzbudzaniu sygnalizacji świetlnej. Przykłady nadajnika i czujnika w detekcji opartej na promieniowaniu podczerwonym zostały przedstawione na fot. 4 i 5.

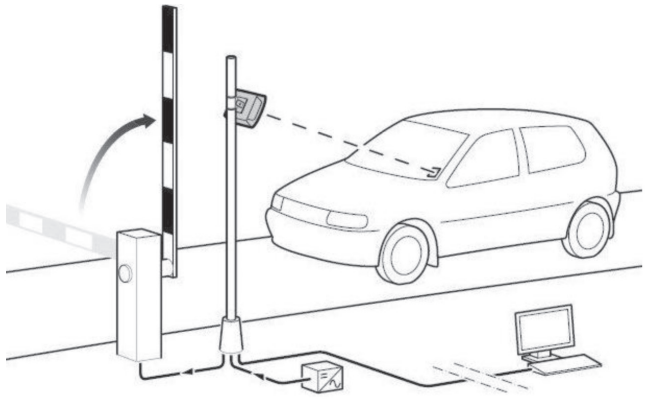
Detekcja za pomocą znaczników RFID

Detekcja za pomocą znaczników RFID (z ang. *radio-frequency identification*) stosowana jest obecnie głównie w logistyce, jednakże możliwości tej technologii mogłyby zostać wykorzystane także w detekcji pojazdów transportu zbiorowego. Aby detekcja była możliwa, każdy pojazd musiałby zostać wyposażony w jeden lub więcej znaczników (aktywnych lub pasywnych) oraz w obrębie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną musiałyby zostać zamontowane czytniki RFID z antenami.

Zastosowanie technologii RFID w detekcji pojazdów transportu zbiorowego ma pewne zalety. Najważniejszą jest cena, koszt odpowiednich znaczników pasywnych to kilkadziesiąt groszy (znaczniki aktywne są kilkanaście razy droższe jednakże działają na znacznie większym zasięgu). Dodatkowo pojedyncze czytniki są w stanie odbierać sygnał od wielu znaczników naraz, dzięki czemu nie ma potrzeby dla każdego wlotu (w przypadku skrzyżowań) montowania oddzielnych czytników. Obecnie dostępne technologie znaczników i czytników RFID zapewniają nie tylko dobrą odporność na zakłócenia, ale także coraz większy zasięg czytników.

W przypadku transportu zbiorowego technologia RFID mogłaby zostać wykorzystana nie tylko do detekcji pojazdów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną, ale także m.in. na przystankach i końcówkach linii. Tego typu rozwiązanie dałoby możliwość zbierania wielu potrzebnych danych, takich jak m.in. czas obsługi pasażerów na przystankach, rzeczywisty czas postoju pojazdów na końcówkach linii, czas przejazdu między poszczególnymi przystankami czy dokładne informacje na temat kolejkowania się pojazdów na ciągach komunikacyjnych.

Technologia RFID wykorzystywana obecnie w transporcie miejskim stosowana jest głównie do weryfikacji użytkowników wjeżdżających do stref ograniczonego ruchu. Sposób i przykład działania technologii RFID w transporcie został przedstawiony na rys. 4 i fot. 6.



Rys. 4. Sposób działania technologii RFID w transporcie
Źródło: http://www.ide.com.pl/grafika/tag_auto_big.jpg

Fot. 6. Przykład działania technologii RFID w transporcie
Źródło: http://www.kathrein.pl/down/RFID/news-img/parking%20rfid%201.jpg

Podsumowanie

Odpowiednia detekcja pojazdów transportu zbiorowego umożliwia efektywniejsze wykorzystanie systemów sterowania ruchem (w tym podsystemów odpowiedzialnych za przyznawanie priorytetu). Dodatkowo dobry wybór sposobu detekcji pojazdów daje możliwość zbierania dużej liczby informacji na temat ruchu pojazdów. Wśród obecnie stosowanych sposobów detekcji nie ma jednak takiego, który mógłby samodzielnie zapewniać prawie stuprocentową dokładność i niezawodność. W celu odpowiedniej detekcji pojazdów transportu zbiorowego powinno się stosować kilka sposobów detekcji jednocześnie, co mimo większych kosztów wdrażania takiego systemu mogłoby zapewnić maksymalną niezawodność i dokładność. Warto także zauważyć, że wszystkie z opisywanych w artykule sposobów detekcji są rozwijane i unowocześniane, przez co zyskują nowe funkcjonalności.

Literatura

1. Adamski A., *Inteligentne Systemy Transportowe: sterowanie, nadzór i zarządzanie*, Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne AGH, Kraków 2003.
2. Gryga Ł., Wojtaszek M., Firlejczyk G., *Obszarowy system sterowania ruchem i nadawanie priorytetu dla transportu zbiorowego w Krakowie*, „Transport Miejski i regionalny", 2013, nr 6.
3. Leśko M., Guzik J., *Sterowanie Ruchem drogowym, sygnalizacja świetlna i detektory ruchu pojazdów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
4. Molecki A., *Kształtowanie priorytetu tramwajowego w procesie wdrażania ITS we Wrocławiu*, „Przegląd Komunikacyjny", 2015, nr 5.
5. Piecha J., *Systemy informatyczne transportu – badania, inżynieria, kształcenie*, „ITS Przegląd", luty 2009.