

Modelowanie mikroskopowe w kontekście testowania algorytmów z priorytetem dla tramwajów¹

JAROSŁAW SZUSTEK

mgr inż., Tramwaje Warszawskie sp. z o.o., ul. Siedmiogrodzka 20, 01-232 Warszawa, tel.: +48 693 792 329, email: jszustek@gmail.com

Streszczenie: Pojęcie priorytetu dla tramwajów jest bardzo ogólne, dlatego przy projektowaniu sygnalizacji świetlnej występuje trudność w określeniu optymalnego poziomu tego priorytetu w konkretnych przypadkach. W artykule zaproponowano wykorzystanie modeli mikroskopowych Vissim do rozwiązania tego problemu. Na podstawie doświadczeń z uprzywilejowaniem ruchu tramwajowego w Warszawie zaproponowano procedury testowania, badania efektywności i implementacji algorytmów akomodacyjnych z priorytetem dla tramwajów. W podsumowaniu referatu zawarto rekomendacje odnośnie szerszego wykorzystania modeli mikrosymulacyjnych w procesie projektowania sygnalizacji świetlnej.

Słowa kluczowe: symulacje mikroskopowe, sygnalizacja akomodacyjna, priorytet dla tramwajów

Wprowadzenie

Zmiana zachowań transportowych mieszkańców miast w kierunku tzw. zrównoważonej mobilności [2] wymaga podejmowania działań na rzecz zwiększania prędkości podróży transportem zbiorowym. Potencjalnie najszybsze są te środki transportu, które dysponują wydzielonymi korytarzami ruchowymi, nienarażonymi na perturbacje wynikające z zatłoczenia motoryzacyjnego, tj. kolej i metro. Trasy tramwajowe rzadko bywają zupełnie bezkolizyjne, mimo to mogą również spełniać ten warunek, jeżeli zapewni się tramwajom możliwość sprawnego przejazdu przez skrzyżowania. Jeśli na skrzyżowaniach bez sygnalizacji świetlnej tramwaje mają zazwyczaj pierwszeństwo, to na skutek działania sygnalizacji świetlnej pojawiają się przyhamowania przejazdu istotnie zmniejszające uzyskiwane prędkości podróży i prędkości eksploatacyjne. Zastosowanie priorytetu dla tramwajów przyczynia się do redukcji tego niekorzystnego zjawiska. Doświadczenia krajowe pokazują, że kolizyjne skrzyżowania na trasach tramwajowych z priorytetem w sygnalizacji nie muszą w istotny sposób zmniejszać prędkości podróży poniżej prędkości normatywnej [9], [4]. Wprowadzanie priorytetu dla tramwajów jest korzystne nie tylko z punktu widzenia pasażerów, ale także operatorów, gdyż zmniejsza koszty eksploatacyjne floty pojazdów, a odzyskane w ten sposób środki mogą przyczynić się do dalszej poprawy jakości świadczonych usług. Prowadzi to do osiągnięcia wysokiej rentowności w takich przedsięwzięciach [9].

Konsensus co do zasadności stosowania priorytetu dla tramwajów panuje jedynie na dużym poziomie ogólności. Przykład Warszawy dowodzi, że upływa dużo czasu od mo-

mentu uznania w miejskich dokumentach strategicznych konieczności uprzywilejowania tramwajów do momentu uzyskania wymiernych korzyści w faktycznych projektach [16], [13]. Pojawia się bowiem nietrywialne pytanie, do jakiego stopnia i jakimi metodami (funkcjonalnymi, technicznymi, organizacyjnymi) należy zrealizować priorytet dla tramwajów i jakie to wywoła skutki dla poszczególnych uczestników ruchu. Modele mikroskopowe pozwalają wypełnić tę lukę, dostarczając skuteczne narzędzia do projektowania, oceny oraz testowania algorytmów sterowania ruchem.

Stosowane w Warszawie metody nadawania priorytetu dla tramwajów

Na tle innych miast polskich w Warszawie stosunkowo późno zaczęto wprowadzać priorytet dla tramwajów. Pierwszą skuteczną aplikację priorytetu zrealizowano na trasie Bemowo – Piaski, oddanej do użytku w 2005 r. [1]. Obejmował on 5 skrzyżowań w ciągu ul. Powstańców Śląskich i al. Reymonta, na którym zainstalowano system sterowania Marathon. Pomimo uzyskania poprawnej prędkości podróży (19–21 km/h) przyjęte rozwiązania techniczne nie weszły do szerokiego zastosowania. Główne zastrzeżenia dotyczyły ograniczonej przewidywalności działającego tam sterowania grupowego, podczas gdy w Warszawie preferowane są algorytmy fazowe. Drugie podejście do priorytetu dla tramwajów stanowiło wdrożenie w latach 2006–2008 Zintegrowanego Systemu Zarządzania Ruchem. Priorytet uruchomiono na 9 skrzyżowaniach na głównej trasie tramwajowej w mieście, przebiegającej ciągiem Al. Jerozolimskich. Nie umożliwiło to jednak skrócenia rozkładowego czasu przejazdu tramwajów. Na krytycznym odcinku: rondo de Gaulle’a – pl. Zawiszy prędkość podróży tramwajów zawiera się w przedziale 13–17 km/h. Wynika to z faktu, że lokalna adaptacja programu, którą tam zastosowano [8], nie sprawdza się przy ekstremalnym obciążeniu skrzyżowań ruchem indywidualnym i tramwajowym. Równocześnie ta sama lokalna adaptacja może zakłócać koordynację sygnalizacji świetlnej, która była projektowana jako tzw. zintegrowana koordynacja tramwajowo-samochodowa [6]. Prawidłowo działająca koordynacja tego typu powinna zmniejszać poziom strat czasu zarówno tramwajów, jak i pojazdów indywidualnych.

W wyniku zebranych doświadczeń zmodyfikowano założenia do realizacji priorytetów tramwajowych. Zamiast zakupu gotowych systemów zdecydowano się na opracowywanie algorytmów otwartych, to znaczy jawnie opisa-

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2016.

nych schematami blokowymi, dedykowanych konkretnym trasom tramwajowym i skrzyżowaniom. Wykorzystano przy tym doświadczenia miast polskich eksploatujących trasy szybkiego tramwaju (poznanskie [12] i krakowskie [4]), adaptując je do lokalnych wymagań. Powyższe podejście zastosowano na nowo budowanych trasach: Metro Młociny – Tarchomin Kościelny (długość: 4,6 km toru podwójnego; uruchomiona 23.12.2014), w ciągu ul. Powstańców Śląskich między ul. Radiową i ul. Górczewską (długość: 2,6 km toru podwójnego; uruchomiona 14.02.2015) oraz na trasach modernizowanych (al. Zieleniecka – ul. Targowa, ul. Marymoncka oraz trasa Dw. Wileński – Żerań Wsch.; łącznie 13,5 km toru podwójnego, główne prace realizowane w 2015 roku).

Do końca 2015 roku algorytmy otwarte zaprojektowano i wdrożono dla łącznej liczby 50 skrzyżowań. Wśród tych algorytmów można dokonać podziału:

- ze względu na sposób koordynacji z sąsiednimi skrzyżowaniami: sztywno skoordynowane (o stałej długości cyklu), elastycznie skoordynowane (o zmiennej długości cyklu), izolowane (odosobnione);
- ze względu na strukturę: fazowe, grupowe, fazowo-grupowe (hybrydowe);
- ze względu na kolejność faz (grup): ze stałą i zmienną kolejnością;
- ze względu na poziom priorytetu: pełny (bezstratny), wysoki (do kilku sekund średniej straty w przeliczeniu na tramwaj), niski (pozostałe przypadki).

Wspólną cechą wyżej wymienionych algorytmów jest bardzo duża złożoność nie tylko samego opisu, ale przede wszystkim działania.

Potrzeba zastosowania modeli mikroskopowych do oceny algorytmów sterowania z priorytetem dla tramwajów

Typowy projekt sygnalizacji świetlnej zgodnie z przepisami krajowymi [17] poddaje się ocenie za pomocą wyznaczonych analitycznie (np. według [15]), zagregowanych miar sprawności infrastruktury transportowej takich jak np.: przepustowość, długość kolejek, straty czasu, liczba zatrzymań. Wymienione wyżej przykładowe parametry określone są dla bazowych programów stałoczasowych, ale nie dla programów adaptacyjnych. Uzasadnieniem dla takiego podejścia jest przyjęcie założenia, że sterowanie adaptacyjne [3] (zmiennoczasowe) poprawi funkcjonowanie skrzyżowania, zapewniając nie gorsze miary jakości ruchu niż program stałoczasowy. Założenie to jest słuszne, jeżeli:

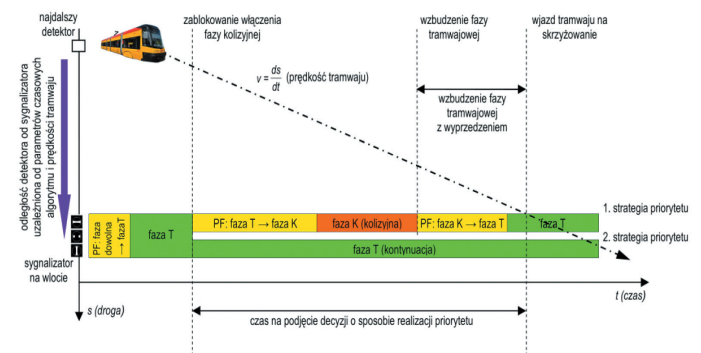
- przy pełnym obciążeniu wlotów skrzyżowania (tzn. ciągłym zapotrzebowaniu na realizację sygnału zezwalającego) proces sterowania zbiega do stanu ustalonego odpowiadającemu programowi bazowemu,
- przy niepełnym obciążeniu wlotów skrzyżowania nie występują przypadki pominięcia obsługi wybranych użytkowników ruchu,
- nie występują inne błędy wynikające z niedbałości projektanta lub programisty sterownika sygnalizacji świetlnej.

Łatwo wykazać, że w przypadku stosowania priorytetu dla tramwajów pierwszy z wyżej wymienionych warunków jest niespełniony, ponieważ proces sterowania nie będzie zbiegał do programu bazowego. W najprostszym ujęciu w programie akomodacyjnym, realizującym pełny priorytet dla tramwajów, blokowane jest załączenie fazy kolizyjnej z ruchem tramwajowym. Wymaga to reakcji na pojawienie się tramwaju z minimalnym wyprzedzeniem czasowym danym wzorem:

$$t_w = t_{PF(T-K)} + t_{\min(K)} + t_{PF(K-T)} + t_r + \frac{1}{2} t_h \quad (1)$$

gdzie: $t_{PF(T-K)}$ – czas trwania przejścia międzyfazowego prowadzącego do fazy kolizyjnej, $t_{\min(K)}$ – minimalny czas trwania fazy kolizyjnej, $t_{PF(K-T)}$ – czas trwania przejścia międzyfazowego do chwili załączenia grup tramwajowych, t_r – czas reakcji motorniczego, t_h – czas hamowania.

Odpowiednio wczesne wykrycie tramwaju pozwala na modyfikowanie strategii sterowania w taki sposób, aby tramwaj nie napotkał fazy kolizyjnej, zgodnie z rys. 1.



Rys. 1. Zasada nadawania pełnego priorytetu dla tramwajów

Źródło: opracowanie własne

Algorytmy sterowania przydzielające priorytet dla tramwajów zawierają procedury, które mogą blokować lub opóźniać włączanie faz ruchu kolizyjnych z ruchem tramwajowym oraz zmieniać długość faz ruchu. W warunkach nasycenia ruchu na skrzyżowaniu proces sterowania nie będzie dążyć do programu bazowego stałoczasowego. Ponadto priorytetowa obsługa tramwajów prowadzi do redystrybucji nadwyżek przepustowości. Względny udział sygnału zezwalającego dla strumieni ruchu kolizyjnych z tramwajami ulega redukcji, a zwiększa się dla strumieni współbieżnych.

Jeżeli projekt sygnalizacji świetlnej zawiera tylko obliczenia miar jakości ruchu dla programów bazowych, skutki uruchomienia akomodacji z priorytetem dla tramwajów są do pewnego stopnia niewiadome. Jest to jeden z głównych powodów, dla których organy zarządzające ruchem niechętnie zatwierdzają projekty sygnalizacji świetlnej z priorytetem dla tramwajów, a zwłaszcza z priorytetem pełnym. Zatwierdzenie projektu oznacza bowiem wzięcie odpowiedzialności za przyszłe działanie sygnalizacji świetlnej, które może okazać się nieefektywne, np. nakładać zbyt duże restrykcje na ruch pojazdów indywidualnych lub pieszych.

Rozwiązaniem tego problemu jest opracowanie mikroskopowego modelu symulacyjnego, w którym można ocenić zjawiska ruchowe trudne do opisanego w sposób analityczny. Na podstawie wyników symulacji organ zarządzający ruchem będzie mógł zweryfikować działanie projektowanych programów akomodacyjnych z priorytetem dla tramwajów i dokonać miarodajnego wyboru optymalnej strategii sterowania.

Procedura analizy mikroskopowej przy wdrażaniu priorytetu na przykładzie modernizacji trasy tramwajowej Dw. Wileński – Żerań Wschodni

W ramach projektu modernizacji trasy tramwajowej Dw. Wileński – Żerań Wschodni planowana była realizacja priorytetów tramwajowych na 13 skrzyżowaniach [5]. Wykonawca dokumentacji projektowej zobowiązany był do zapewnienia priorytetu na wszystkich skrzyżowaniach w celu uzyskania prędkości podróży co najmniej 23 km/h w godzinach szczytu, przy czym zalecany poziom priorytetu był zróżnicowany:

- priorytet pełny na 6 skrzyżowaniach;
- priorytet wysoki na 4 skrzyżowaniach;
- priorytet częściowy na 3 skrzyżowaniach najbardziej obciążonych ruchem, na których ciągi przecinające trasę tramwajową również są koordynowane.

We wstępnej fazie przygotowywania projektów stałej organizacji ruchu i projektów sygnalizacji równolegle opracowywany był mikroskopowy model ruchu z wykorzystaniem środowiska symulacyjnego PTV Vissim (wersja 5.4x) [10]. W pojedynczym modelu odwzorowano całą analizowaną trasę tramwajową. Odwzorowana infrastruktura obejmowała m.in. układ geometryczny ulic i torowiska, skrzyżowania, ograniczenia prędkości, rozmieszczenie linii zatrzymań na skrzyżowaniach, zasady pierwszeństwa oraz lokalizacje przystanków autobusowych i tramwajowych (wraz z gęstościami rozkładów czasów obsługi przystanków). Sieć obciążono ruchem zgodnym z wykonanymi pomiarami i prognozami ruchu, a w przypadku pojazdów publicznego transportu zbiorowego – według rozkładów jazdy. Takt kursowania był jednak modyfikowany w taki sposób, aby nie tworzył małych wspólnych wielokrotności z czasami cykli sygnalizacji, co mogłoby być źródłem błędów systematycznych. Przykładowy mikroskopowy model skrzyżowania przedstawia rys. 2.

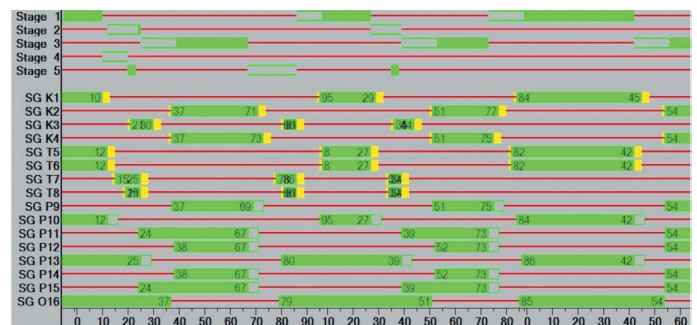


Rys. 2. Mikroskopowy model skrzyżowania 11 Listopada – Stalowa
Źródło: opracowanie własne

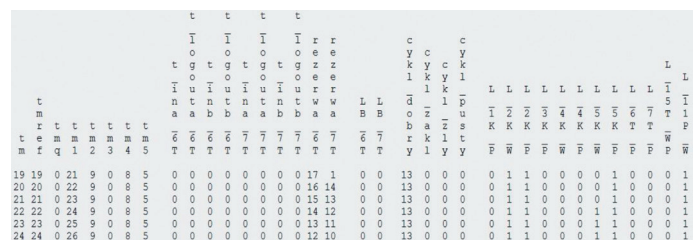
Opracowany model mikroskopowy został poddany kalibracji, a następnie posłużył do wyznaczenia czasów przejazdu tramwajów między poszczególnymi skrzyżowaniami na odcinkach, dla których projektowano koordynację tramwajowo-samochodową (ul. 11 Listopada i ul. Odrowąża). Pozyskanie informacji o czasach przejazdu tramwajów z modelu mikroskopowego, a nie z pomiarów w terenie, pozwoliło wyeliminować błąd systematyczny związany z taktyką jazdy motorniczych. Taktyka ta uzależniona jest ściśle od rozkładu jazdy oraz od przewidywanego działania sygnalizacji świetlnej na trasie (por. [7]).

Opracowane algorytmy akomodacyjne zostały wprowadzone do modelu mikrosymulacyjnego za pomocą języka VAP i edytora VisVap [11]. Język ten jest zintegrowany z programem Vissim, a zarazem nie jest związany z żadnym dostawcą sterowników. Stanowi to zaletę, gdyż przyczynia się do zapewnienia równej konkurencji na rynku sprzętowym.

Proces badania algorytmów w modelu mikroskopowym składał się z następujących po sobie etapów. W pierwszym etapie odbywała się weryfikacja poprawności zapisu algorytmów i eliminacja błędów redakcyjnych i edycyjnych projektanta. W drugim zweryfikowane zostało osiągnięcie celów projektu w postaci uzyskania wymaganego maksymalnego poziomu strat czasu tramwajów. W przypadku około połowy skrzyżowań konieczne były poprawki, które wykonywano iteracyjnie. Następnie w trzecim etapie prowadzone były dokładne testy algorytmów w poszukiwaniu wszelkich nietypowych błędów, które mogą zakłócić poprawne działanie akomodacji na skrzyżowaniu. W ramach końcowych testów analizowane były przebiegi czasowe faz ruchu oraz poszczególnych sygnałów, co zilustrowano przykładem na rys. 3, oraz stany wewnętrzne zmiennych algorytmu – rys. 4. Ocena poprawności działania skomplikowanych algorytmów nie jest możliwa tylko na podstawie porównania stanów wejść i sygnałów wyjściowych.



Rys. 3. Wykres paskowy sygnałów podczas realizacji sterowania akomodacyjnego na skrzyżowaniu 11 Listopada – Stalowa
Źródło: opracowanie własne



Rys. 4. Zmiany stanów wewnętrznych algorytmu sterowania akomodacyjnego na skrzyżowaniu 11 Listopada – Szwedzka w kolejnych krokach symulacji
Źródło: opracowanie własne

Projekty, które pozytywnie przeszły weryfikację, zostały skierowane do zatwierdzenia i zostały zaakceptowane przez organ zarządzający ruchem.

Na etapie programowania sterowników sygnalizacji świetlnej przeprowadzono ponowną weryfikację w tym samym modelu mikroskopowym, przy czym sterowniki VAP zostały w nim zastąpione emulatorami rzeczywistych urządzeń. Wymagano zgodności przebiegów czasowych oraz zmian stanów wewnętrznych każdego emulatora sterownika z odpowiadającym mu wirtualnym sterownikiem VAP. Dzięki temu uzyskano gwarancję pełnej zgodności implementacji z zatwierdzonymi projektami.

W okresie uruchamiania algorytmów akomodacyjnych z priorytetem dla tramwajów rozkładowe czasy przejazdu zostały już wstępnie skrócone, aby motorniczowie nie tracali zaoszczędzonego na skrzyżowaniach czasu. Następnie po uruchomieniu wszystkich skrzyżowań z priorytetem zostały przeprowadzone szczegółowe pomiary czasu przejazdu realizowane w ramach Systemu Nadzoru Ruchu Tramwajowego. Zestawienie wyników tych pomiarów oraz pomiarów przeprowadzonych w modelu mikroskopowym przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1

Odcinkowe czasy przejazdu według pomiaru i modelu mikroskopowego na odcinku między przystankami Bródnowska – Annapol					
czas do przystanku:	pomiar [min]	model [min]	czas do przystanku:	pomiar [min]	model [min]
Annapol	0,0	0,0	Inżynierska	0,0	0,0
Toruńska	1,1	1,0	Bródnowska	2,0	1,6
Kondratowicza	1,1	1,1	Rondo Żaba	2,2	1,5
Poborzańska	0,9	0,9	Staniewicka	1,2	2,1
Rembielińska	1,3	0,8	Pożarowa	1,1	1,1
Julianowska	1,6	1,3	Budowlana	1,2	1,1
Budowlana	1,0	1,2	Julianowska	1,8	1,4
Pożarowa	1,2	0,9	Rembielińska	1,0	0,9
Staniewicka	1,7	1,2	Poborzańska	0,8	0,7
Rondo Żaba	2,2	1,6	Kondratowicza	1,2	1,4
Bródnowska	2,0	2,1	Toruńska	1,2	1,0
suma:	14,1	12,1	suma:	13,7	13,0
$v_{\text{podróży}}$ [km/h]	21,8	25,5	$v_{\text{podróży}}$ [km/h]	22,4	23,7

źródło: opracowanie własne

Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono występowanie nadwyżek czasu w rozkładach jazdy. Po przeprowadzeniu dokładnych obserwacji ruchu tramwajów na zmodernizowanej trasie stwierdzono, że motorniczowie celowo opóźniają odjazdy z przystanków lub zmniejszają prędkość na odcinkach międzyprzystankowych, aby zgubić nadmiar czasu (por. [7]). W związku z powyższym na przełomie kwietnia i maja 2016 roku rozkładowe czasy przejazdu tramwajów zostały skrócone do poziomu odpowiadającego wartościom z modelu mikroskopowego. Pierwsze obserwacje potwierdziły, że nowe rozkłady jazdy są prawidłowo realizowane. Badania czasu przejazdu tramwajów oraz punktualności odjazdów będą kontynuowane w celu zebrania liczniejszej próby danych.

W literaturze opisywane są problemy z dokładnością oszacowania normatywnych prędkości podróży na trasach tramwajowych [14]. Na omawianej trasie tramwajowej eksperymenty mikrosymulacyjne oraz pomiary powdrożeniowe wykazały, że uzyskano zakładaną prędkość podróży równą co najmniej 23 km/h w godzinach szczytu, którą przyjęto na podstawie wytycznych zespołu A. Krycha [8].

Podsumowanie

Stosowanie priorytetów dla pojazdów transportu zbiorowego w ramach funkcjonowania systemów sterowania ruchem miejskim może przynieść korzyści dla pasażerów oraz operatorów transportu zbiorowego. Jednakże projekty algorytmów sterowania ruchem z priorytetem dla tramwajów są złożone, a przez to trudne do weryfikacji i oceny. Stosowanie analitycznych metod wyznaczania miar jakości ruchu nie znajduje w ich przypadku zastosowania. Można i należy w tym celu posługiwać się mikroskopowymi modelami ruchu, które umożliwiają:

- wykrywanie błędów redakcyjno-edycyjnych w projektach,
- przeprowadzanie weryfikacji projektów sygnalizacji świetlnej pod kątem zgodności z wymaganiami inwestora,
- weryfikowanie miar jakości ruchu w celu doboru odpowiedniego poziomu priorytetu do konkretnego przypadku,
- testowanie zgodności implementacji projektów z sterownikami sygnalizacji świetlnej z projektami zatwierdzonymi przez organ zarządzający ruchem,
- weryfikację rozkładowych czasów przejazdu i proponowanie korekt w rozkładach jazdy tramwajów.

Ponadto na podstawie zebranych doświadczeń można sformułować następujące dodatkowe rekomendacje:

- zaleca się opracowywanie algorytmów akomodacyjnych z priorytetem dla tramwajów najpierw w środowisku symulacyjnym, a dopiero później tworzenie dokumentacji papierowej, aby unikać prac traconych;
- przekazywanie kodu źródłowego algorytmu wraz z modelem mikroskopowym w formie edytowalnej umożliwiłoby organowi zarządzającemu ruchem pogłębiłą analizę projektów sygnalizacji świetlnej;
- proponuje się wprowadzenie do przepisów krajowych [17] zalecenia stosowania symulacji mikroskopowych w przypadku projektów sygnalizacji świetlnej z priorytetem dla tramwajów oraz bardziej skomplikowanych projektów sterowania zależnego od ruchu – przez analogię do wymogu stosowania prognoz ruchu w modelach makroskopowych w opracowaniach studialnych.

Dzięki zebranych pozytywnym doświadczeniom modele mikroskopowe stały się wymaganą, rutynową częścią procedury projektowania, zatwierdzania i implementacji algorytmów akomodacyjnych z priorytetem dla tramwajów w Warszawie.

Literatura

1. Brzeziński A., Rezwow M., *Tramwaj z Bemowa na Bielany, „Rynek Kolejowy”*, 2006, nr 9.
2. Chamier-Gliszczyński N., Krzyżyński T., *Zrównoważona mobilność w miastach, „Logistyka”*, 2011, nr 3.
3. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKiŁ, Warszawa 2008.
4. Gondek S., *Czy tramwaj szybki skrócił czas podróży?*, „Logistyka”, 2010 nr 4.
5. Witryna internetowa Tramwajów Warszawskich Sp. z o.o., <https://tw.waw.pl/inwestycje/> (odsłona z dnia 09.05.2016 r.).
6. Kaczmarek M., *Zintegrowana koordynacja tramwajów i pojazdów indywidualnych w korytarzach transportowych*, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, Nowoczesny Transport Publiczny w Obszarach Zurbanizowanych, SITK Poznań, materiały konferencyjne, Poznań 15–17.06.2011 r.
7. Krych A., *Efektywne przyspieszenie transportu tramwajowego w sterowaniu z priorytetem*, Polski Kongres ITS, ITS Polska, Warszawa 2009 (CD).
8. Krych A. i in., *Systemy priorytetu dla tramwajów w sygnalizacji w zastosowaniach krajowych*, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna z cyklu: Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego, Nowoczesny Transport Publiczny w Obszarach Zurbanizowanych, SITK Poznań, materiały konferencyjne, Poznań 15–17.06.2011 r.
9. Krych A., *Szybki i szybszy tramwaj – ewaluacja idei i aplikacji na przykładzie Poznania*, Międzynarodowa Konferencja i Wystawa „Transport publiczny w Warszawie kluczem harmonijnego rozwoju stolicy Polski”, Biuro Komunikacji UM st. Warszawy, materiały konferencyjne, tom II, Warszawa 10–11.10.2005 r..
10. PTV Vissim 5.40 User Manual, PTV AG, Karlsruhe 2012.
11. PTV VisVap 2.16 User Manual, PTV AG, Karlsruhe 2012.
12. Rychlewski J., *Doświadczenia ze stosowania priorytetu tramwajowego w Poznaniu*, „Przegląd Komunikacyjny”, 2010, nr 4–6.
13. *Strategia Zrównoważonego Rozwoju Systemu Transportowego Warszawy do 2015 r. i na lata kolejne*, Uchwała Nr LVIII/1749/2009 Rady m.st. Warszawy.
14. Szmagliński J., *Analiza odcinków generujących straty czasu w transporcie tramwajowym*, „Przegląd Komunikacyjny”, 2015, nr 6.
15. Tracz M. i in., *Metoda obliczania przepustowości skrzyżowań z sygnalizacją świetlną*, opracowana na zlecenie Generalnej Dyrekcji Dróg Krajowych i Autostrad, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.
16. Uchwała Nr XXVI/193/95 Rady Miasta Stołecznego Warszawy z dnia 27 listopada 1995 r. w sprawie polityki transportowej dla m.st. Warszawy.
17. Rozporządzenie ministra infrastruktury z dnia 3 lipca 2003 r. w sprawie szczegółowych warunków technicznych dla znaków i sygnałów drogowych oraz urządzeń bezpieczeństwa ruchu drogowego i warunków ich umieszczania na drogach (Dz. U. z 2003 r. Nr 220, poz. 2181 z późn. zm.), Zał. nr 3.

Dokończenie tekstu ze strony 17

9. Karoń G., Krawiec S., Żochowska R., Sobota A., *Metodologia i szczegółowa koncepcja przeprowadzenia badań ruchu i sposobu opracowania modelu ruchu na obszarze działania Komunikacyjnego Związku Komunalnego GOP*, Praca naukowo-badawcza NB-179/RT5/2015, Politechnika Śląska, Katowice 2015.
10. Karoń G., Łazarz B., *Wybrane zagadnienia budowy modelu ruchu*, „Logistyka”, 2010, nr 4.
11. Larsen, O., *Estimating independent and simultaneous trip frequency models for all travel purposes with combined Logit/Poisson*, European Transport Conference, Strasbourg 2003.
12. Macioszek E., Żochowska R., Karoń G., *Problemy gromadzenia danych dla potrzeb modelowania podróży i prognozowania ruchu*, Ogólnopolska Konferencja Naukowo-Techniczna „Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu”, Kraków 18–19 listopada 2010. Zeszyty naukowo-techniczne SITK RP o/Kraków, Kraków, 2010, Zeszyt nr 94.
13. Marvin L. Manheim, *Fundamentals of Transportation Systems Analysis*, MIT Press, Cambridge, Massachusetts 1979.
14. Mitchell R.B., Rapkin C., *Urban Traffic: A Function of Land Use*. Columbia University Press, New York 1954.
15. Ortuzar J., Willumsen L.G., *Modelling transport*, 3rd Edition. Wiley, New York 2009.
16. Sobota A., Janecki R., Karoń G., Żochowska R. i in., *Zintegrowany system zarządzania transportem na obszarze miasta Bielska-Białej, etap I – wykonanie Modelu Ruchu*. Praca NB 148/RT-5/13/14. Politechnika Śląska, Katowice – Bielsko-Biała 2015.
17. *Strategia Rozwoju Bielska-Białej do 2020 roku*, Bielsko-Biała 2012.
18. *Strategia rozwoju subregionu południowego województwa śląskiego wraz ze strategią regionalnych inwestycji terytorialnych na lata 2014–2020. Projekt*, Bielsko-Biała 2014.
19. Supernak J., *Modele powstawania miejskiego ruchu osobowego*, WKiŁ, Warszawa 1980.
20. *Wieloletni plan rozwoju zintegrowanego systemu transportowego miasta Katowice*, Urząd Miasta Katowice 2015, wersja z konsultacji społecznych, luty 2016.
21. Witryna internetowa GUS <http://stat.gov.pl/> odsłona 12.09.2014.
22. Witryna internetowa Wikipedia.pl.wikipedia.org/Wiki/Podgórze_Śląskie, odsłona 7.08.2014.

Dokończenie tekstu ze strony 23

Ponadto wskazane jest przeprowadzenie badań odmienną techniką pomiarową i/lub metodyką analizy danych. Pozwoli to na stosowną weryfikację otrzymanych wyników.

Literatura

1. Drake J.S., Schofer J.L., May A.D., *A Statistical Analysis of Speed Density Hypotheses*, Third International Symposium on the Theory of Traffic Flow Proceedings, Elsevier North Holland, Inc. New York 1967.
2. Edie L.C., *Car-Following and Steady-State Theory for Noncongested Traffic*, Operation Research, 1961.
3. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego: teoria i praktyka*. WKiŁ, Warszawa 2011.
4. Greenberg H., *An analysis of traffic flow*, Operations Research, 1959.
5. Greenshields B.D., *A study of traffic capacity*, Ohio State Highway Department, 1935.
6. Hoogendoorn S., Knoop V.L., Taale H., *Traffic Flow Theory and Simulation*, Faculty of Civil Engineering and Geosciences, Delft University of Technology, 2012.
7. Krystek R., *Syntetyczny wskaźnik jakości ruchu ulicznego jako kryterium sterowania*, Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 1980.
8. Matusz P., Paluszkiwicz T., Rudecki G., *Modelowanie wybranych zależności między parametrami ruchu na drodze ekspresowej i ulicach na przykładzie Trójmiasta*, praca magisterska, Politechnika Gdańska, 2015.
9. May A.D., *Traffic Flow Fundamentals*, Wydawnictwo Prentice Hall, New Jersey 1990.
10. Transportation Research Board: *75 Years of the Fundamental Diagram for Traffic Flow Theory*, Greenshields Symposium, Massachusetts 2008.
11. Underwood R.T.: *Speed, volume, and density relationships: Quality and theory of traffic flow*, Yale Bureau of Highway Traffic, 1961.
12. Van Aerde M., *Multivariate calibration of single regime speed-flow-density relationship*, Vehicle Navigation and Information Systems Conference, Seattle 1995.