

ANALIZA CZYNNIKÓW MAJĄCYCH WPŁYW NA PRĘDKOŚCI PRZEJAZDU TRAMWAJÓW NA WYDZIELONYCH TOROWISKACH DLA POTRZEB BUDOWY MODELI MAKROSYMULACYJNYCH

Marek Bauer

dr inż., Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: +48 12 628 2533, e-mail: mbauer@pk.edu.pl

Streszczenie. W artykule poruszono problem wpływu jakości odwzorowania sieci transportu zbiorowego na jakość makrosymulacyjnych modeli sieci transportowych. Omówiono czynniki wpływające na czas i prędkość przejazdu tramwajów po wydzielonych torowiskach, a następnie wyselekcjonowano te czynniki, które w stosunkowo łatwy sposób można uwzględnić podczas modelowania czasu przejazdu poszczególnych odcinków sieci. Wykorzystując metody analizy wariancji przeanalizowano zmienność prędkości przejazdu tramwajów w zależności od długości odcinka, liczby skrzyżowań z sygnalizacją i zastosowanego priorytetu, stanu torowiska tramwajowego oraz natężenia ruchu tramwajów – w oparciu o wyniki pomiarów wykonanych na sieci tramwajowej Krakowa. Efektem finalnym jest tabela średnich prędkości tramwajów, która stanowi narzędzie wspomagające modelowanie czasu przejazdu tramwajów.

Słowa kluczowe: komunikacja tramwajowa, prędkość przejazdu, model sieci transportowej

1. Wprowadzenie

Wysoka jakość analiz wykonywanych z wykorzystaniem makrosymulacyjnych modeli sieci transportowych jest najczęściej efektem wzajemnego powiązania wysokiej klasy modeli analitycznych oraz modeli sieci. Modele analityczne bazują najczęściej na strukturze modelu cztero-stadiowego, obejmującego generację podróży, rozkład przestrzenny podróży, podział zadań przewozowych oraz rozkład ruchu w sieci transportowej [4,7,8]. Modele te wykorzystują bazy danych zawierające między innymi informacje na temat liczby, motywacji i charakteru odbywanych podróży [10] oraz wykorzystania środków transportu. Informacje te są agregowane na poziomie zdefiniowanych rejonów komunikacyjnych dla stanu obecnego oraz dla określonych przyszłych horyzontów czasowych.

Natomiast modele sieci mają za zadanie jak najwierniejsze odwzorowanie stanu infrastruktury transportowej. Ze względu na mnogość odcinków sieci, jest to zazwyczaj zadanie niełatwe. W przypadku komunikacji indywidualnej, wymagane jest pozyskanie wiarygodnych informacji na temat przepustowości odcinków oraz prędkości, które można na nich osiągnąć w warunkach ruchu niezakłóconego, jak

również wielkości strat czasu na skrzyżowaniach. Szczegółowe określenie tylko tej nielicznej wymienionej grupy parametrów w skali dużego miasta jest praktycznie niemożliwe. Dlatego, niezbędne parametry odcinków sieci są najczęściej określane w sposób przybliżony, na zasadzie dopasowania wartości charakterystycznych dla określonych typów odcinków sieci ulic. Przykładowo, w programie komputerowym Visum [5], do dyspozycji autorów modeli oddano 99 typów odcinków, dla których można zakodować potrzebne informacje.

W przypadku komunikacji zbiorowej, której funkcjonowanie jest ściśle określone rozkładami jazdy – są to głównie informacje o zakładanych czasach przejazdu odcinków międzyprzystankowych lub co bardziej użyteczne – informacje na temat prędkości przejazdu poszczególnych odcinków sieci. Wówczas, niezbędne jest również określenie długości czasu postoju na przystankach. W tym celu, zazwyczaj wykorzystywane są informacje pochodzące z jednego z poniższych źródeł:

- **Rozkładowe czasy przejazdu** – stosunkowo najłatwiejsze do pozyskania od zarządców lub operatorów transportu zbiorowego. Dzisiejsze programy symulacyjne stwarzają na ogół możliwość importowania plików ze szczegółowymi rozkładami jazdy. Jest to jednak podejście obciążone pewnymi wadami. Podstawową wadą jest częsty brak dopasowania rozkładów jazdy do faktycznych czasów przejazdu linii, co może skutkować budową modelu odzwierciedlającego bardziej zamierzenia zarządcy systemu transportowego niż faktyczny stan systemu. Kłopotliwy jest również brak możliwości rozdzielenia rozkładowego czasu przejazdu na czas przejazdu odcinka międzyprzystankowego i czas postoju na przystanku.
- **Wyniki pomiarów czasu przejazdu na liniach komunikacji zbiorowej**, pochodzące z pomiarów wykonywanych podczas codziennej obsługi linii [1]. Szczególnie przydatne są wyniki pomiarów powtarzalnych, na przykład prowadzonych za pomocą odbiorników GPS montowanych w pojazdach. Takie wyniki gwarantują najwyższy poziom odwzorowania układu linii w stanie istniejącym. W większości przypadków, istnieje możliwość takiego zaprogramowania badań, aby czasy przejazdu linii były rejestrowane z rozdzieleniem na czasy przejazdu i postoju. Jeśli nie jest to możliwe, pomiary takie powinny być uzupełniane dodatkowymi wrywkowymi badaniami, których celem jest określenie proporcji czasu jazdy i postoju na przystankach. Niestety, w polskich realiach ciągle problemem jest pokrycie pomiarami całej sieci komunikacji zbiorowej.
- **Uniwersalne modele czasu (prędkości) przejazdu linii komunikacji zbiorowej** – budowane na podstawie wyników pomiarów wykonywanych na szeroką skalę. W modelowaniu symulacyjnym obecnego stanu sieci transportu zbiorowego są one przydatne głównie w sytuacji, gdy nie są prowadzone badania czasu przejazdu lub ich jakość nie jest wystarczająca. Natomiast ich szczególnym zastosowaniem są modele sieci budowane dla przyszłych horyzontów czasowych, w których istnieje konieczność uwzględnienia nowych inwestycji transportowych oraz zmian ruchowych w przypadku tych istniejących. Z oczywistych względów, nie ma wówczas

możliwości skorzystania z wyników pomiarów. Problem ten jest często rozwiązywany poprzez proste przeniesienie stanu sieci istniejącej na przyszłe horyzonty. Modele czasu lub prędkości przejazdu odcinków umożliwiają jednak znacznie bardziej wiarygodne określenie przyszłego wykorzystania sieci transportowej, a w konsekwencji także lepsze określenie podziału zadań przewozowych.

W programie Visum, czas przejazdu każdego odcinka sieci przez pojazd transportu zbiorowego jest określany na podstawie długości tego odcinka oraz prędkości przejazdu, zdefiniowanej dla danego typu pojazdu (np. tramwaju), a także typu odcinka. Jest to podejście uniwersalne, gdyż w praktyce długości odcinków są być bardzo zróżnicowane. Na etapie modelowania rozbudowanej sieci łatwiej więc operować prędkością przejazdu niż czasem.

Dlatego, w niniejszym artykule skupiono się na estymacji średnich prędkości przejazdu, na podstawie których program komputerowy będzie wyznaczał czas przejazdu na poszczególnych odcinkach sieci. Ze względu na dużą złożoność zagadnienia, ograniczono się do komunikacji tramwajowej korzystającej z wydzielonych torowisk. Prezentowane wyniki stanowią wycinek szeroko zakrojonych badań poświęconych modelowaniu wszystkich podsystemów komunikacji zbiorowej, pracujących w zróżnicowanych warunkach.

2. Czynniki wpływające na prędkość przejazdu tramwaju po wydzielonym torowisku

Prędkości przejazdu tramwajów są na ogół bardzo zróżnicowane w skali miasta. Zróżnicowanie to, choć w mniejszym zakresie, dotyczy również odcinków, na których tramwaje korzystają z wydzielonych torowisk. Dzieje się tak, gdyż samo wydzielenie torowiska nie zapewnia jeszcze optymalnych warunków przejazdu odcinka między-przystankowego. Wynika to z działania wielu czynników, w tym o charakterze zakłócającym. Czynniki te można podzielić na kilka grup:

- **Czynniki związane z infrastrukturą torowisk i organizacją ruchu**, do których można zaliczyć: zakres i sposób oddzielenia torowiska od pasów ruchu przeznaczonych dla innych pojazdów (oznakowanie, zastosowanie fizycznego oddzielenia – pas zieleni, separator), występowanie i rodzaj sterowania zapewniającego priorytet w sygnalizacji świetlnej, liczba i rozmieszczenie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną i bez sygnalizacji, liczba i rozmieszczenie wydzielonych przejść dla pieszych, stan techniczny torowiska, odległości między kolejnymi przystankami – od których zależy możliwość rozpędzenia tramwaju.
- **Czynniki związane z organizacją przewozów**, między innymi: częstotliwość kursowania poszczególnych linii na wspólnym odcinku sieci oraz ich wzajemne ułożenie w czasie, poziom realistyczności rozkładowych czasów przejazdu, skala i zakres sterowania dyspozytorskiego, częstość kontroli ja-

kości usług przewozowych, sposób dystrybucji biletów w pojeździe (automat biletowy, sprzedaż biletów przez prowadzącego pojazd).

- **Czynniki związane z ruchem tramwajów:** wielkość, zmienność i struktura natężeń ruchu tramwajów, zwłaszcza w krótkich odstępach czasu – powodujące skrócenia interwałów pomiędzy kolejnymi pojazdami na ciągu (szczególnie w bliskim sąsiedztwie przystanków), wielkość aktualnego przyspieszenia lub opóźnienia względem rozkładu jazdy – motywujące do wolniejszej lub szybszej jazdy, zdolność do przyspieszania i hamowania [5] – mające wpływ na osiągnięcie i utrzymanie pożądaney prędkości jazdy, awaryjność pojazdów.
- **Czynniki behawioralne:** poziom umiejętności, dyscyplina, cechy psychofizyczne, dyspozycja dnia motorowych oraz ich umiejętność reagowania na zmiany warunków ruchu oraz opóźnienia lub przyspieszenia względem rozkładu jazdy.
- **Czynniki środowiskowe:** pora roku, rodzaj i pora dnia, warunki atmosferyczne.

Pierwsze dwie grupy skupiają głównie czynniki, które w dużej mierze decydują o poziomie prędkości osiąganych przez tramwaje. Szerokie zastosowanie rozwiązań sprzyjających ruchowi tramwajów (np. fizyczne wydzielenie torowiska, priorytet w sygnalizacji, równe rozkładowe odstępy między pojazdami) powoduje, że prędkości przejazdu na odcinku powinny być relatywnie wysokie. Z kolei zastosowanie rozwiązań niekorzystnych (np. zbyt krótkie odległości między przystankami) już na wstępie zmniejsza prawdopodobieństwo osiągnięcia wysokich prędkości przejazdu. Natomiast czynniki skupione w pozostałych grupach należą zazwyczaj do przyczyn odstępstw od przejazdu z oczekiwaną prędkością, najczęstszym skutkiem jest jej obniżenie.

Zbadanie wielkości wpływu wszystkich czynników na prędkości przejazdu tramwajów jest praktycznie niemożliwe. Sama liczba czynników powoduje, że takie badania byłyby bardzo skomplikowane i drogie – a przez to trudne do przeprowadzenia na szeroką skalę. Z kolei, niektóre wpływy (np.: cechy psychofizyczne i motoryczne kierujących pojazdami) są niemal całkowicie niemierzalne w warunkach rzeczywistych. Dlatego w dalszej części artykułu skupiono się na kilku wybranych czynnikach wpływających na prędkości przejazdu tramwajów na wydzielonych torowiskach.

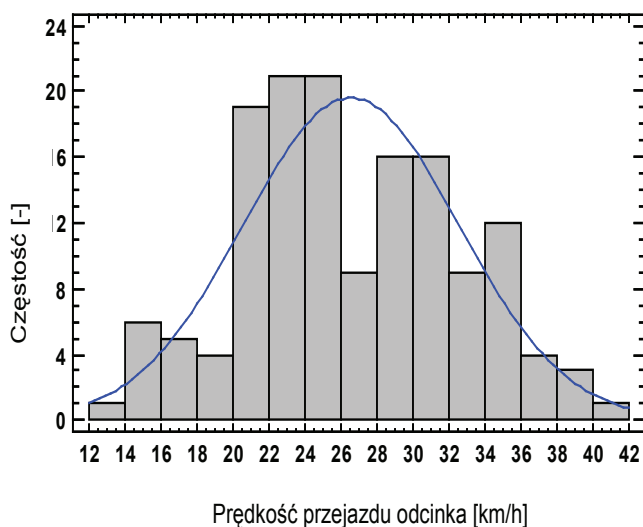
3. Badania wpływu wybranych czynników na prędkości przejazdu tramwajów po wydzielonych torowiskach – na przykładzie Krakowa

Podstawą prowadzonych analiz prędkości tramwajów były wyniki pomiarów czasu przejazdu na liniach komunikacji tramwajowej w Krakowie. Były to pomiary prowadzone w 2013 roku, przez obserwatorów podróżujących tramwajami, z wykorzystaniem ręcznych odbiorników GPS – co zapewniło wysoką jakość

uzyskanych wyników, z podziałem na czasy przejazdu i postoju na przystankach, z zachowaniem jednosekundowej dokładności rejestracji. Ogółem, badaniami objęto blisko 300 odcinków między-przystankowych, co umożliwiło pozyskanie bazy blisko 23 tys. jednostkowych czasów przejazdu.

W niniejszej analizie wykorzystano tylko wyniki pomiarów, pozyskane na odcinkach między-przystankowych z wydzielonymi torowiskami tramwajowymi (ale bez torowisk tramwajowo-autobusowych) na całej długości. Takich odcinków było 147. Pod uwagę wzięto wyniki uzyskane w dni robocze, w umownie przyjętym okresie szczytu popołudniowego (od godz. 15:00 do godz. 19:00). Na każdym z analizowanych odcinków zarejestrowano od 16 do 65 czasów przejazdu – na podstawie których wyznaczono średnie czasy przejazdu w okresie szczytu popołudniowego. Znacząca liczba obserwacji zmniejszyła prawdopodobieństwo pozyskania fałszywych danych o czasach przejazdu poszczególnych odcinków, co wpłynęło pozytywnie na wiarygodność prowadzonych analiz.

Średnie prędkości przejazdu odcinków międzyprzystankowych wyznaczono jako ilorazy długości odcinków i średnich czasów przejazdu. Tym samym dokonano uśrednienia prędkości przejazdu odcinków, która jest zmienna (różne prędkości podczas przyspieszania, jazdy ze stałą lub zmienną prędkością i hamowania). Takie podejście wydaje się być wystarczające dla opracowania modeli średnich prędkości przejazdu tramwajów, które mogłyby być wykorzystywane dla potrzeb modelowania symulacyjnego systemów transportu zbiorowego w skali makro. Na rys. 1 przedstawiono rozkład średnich prędkości przejazdu odcinków w zgromadzonej próbie pomiarowej, natomiast podstawowe charakterystyki prędkości przejazdu tramwajów, wyznaczone na podstawie średnich prędkości przejazdu poszczególnych odcinków) zamieszczono w tabeli 1.



Rys. 1. Rozkład średnich prędkości tramwajów na odcinkach z wydzielonymi torowiskami – na podstawie badań przeprowadzonych w Krakowie (2013).

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki prędkości przejazdu odcinka międzyprzystankowego {km/h} (na podstawie średnich czasów przejazdu oraz długości poszczególnych odcinków)

<i>Minimum</i>	<i>Maksimum</i>	<i>Wartość średnia</i>	<i>Odchylenie standardowe</i>
13,7	40,9	26,6	6,0

Mimo, iż analizie poddano wyłącznie odcinki z wydzielonymi torowiskami, uzyskano bardzo duże zróżnicowanie średnich prędkości przejazdu odcinków. Prowadzi to do wniosku, że analiza wpływu czynników różnicujących prędkości przejazdu jest zasadna. Wybór czynników był podyktowany z jednej strony dotychczasowymi doświadczeniami w tej dziedzinie [2], z drugiej zaś możliwościami technicznymi wykonania pomiarów. Część czynników została zagregowana już we wstępnej fazie prowadzonych analiz. Finalnie, pod uwagę wzięto tylko cztery czynniki:

- długość odcinka międzyprzystankowego,
- liczba skrzyżowań z sygnalizacją świetlną na odcinku oraz występowanie priorytetu dla tramwajów w sygnalizacji,
- natężenie ruchu tramwajów na odcinku między-przystankowym,
- stan techniczny torowiska tramwajowego.

Poniżej przedstawiono wyniki analiz wpływu tych czynników na wielkości średnich prędkości przejazdu na odcinkach międzyprzystankowych. Zostały one wykonane przy wykorzystaniu testu analizy wariancji oraz testów porównań wielokrotnych [3].

3.1. Wpływ długości odcinka na prędkość przejazdu tramwaju

Długość odcinka międzyprzystankowego jest chyba najbardziej naturalnym czynnikiem wpływającym na prędkość przejazdu tego odcinka. Im dłuższy odcinek – tym potencjalnie większa możliwość szybszego przejazdu, zwłaszcza w przypadku wydzielenia torowiska [9]. Długość odcinka została uwzględniona już na etapie obliczania prędkości przejazdu odcinków w oparciu o czasy przejazdu, co jednak nie dyskwalifikuje jej jako czynnika wpływającego na zmienność średniej prędkości w ujęciu ogólnym.

Ponieważ długości analizowanych odcinków sieci charakteryzują się bardzo dużym zróżnicowaniem (od 190 [m] do 1244 [m]) – dokonano ich pogrupowania w przedziałach o rozpiętościach 100 [m], tak aby środki tych przedziałów były krotnościami liczby 100 (przedziały: (150; 250], (250; 350], (350; 450], (450; 550], ..., (1150; 1250]). Stosując jednoczynnikową analizę wariancji ustalono, że na poziomie istotności 0,05 istnieją statystycznie istotne różnice pomiędzy prędkościami przejazdu w poszczególnych przedziałach długości odcinków. Jednak duża liczba przedziałów (11) spowodowała znaczne rozwarstwienie próby pomiarowej, dodatkowo niektóre przedziały były reprezentowane przez zaledwie kilka odcinków. Dlatego dokonano agregacji przedziałów. Wykorzystując testy porównań wielokrotnych (w tym test Duncana [3]) udało się ustalić, że średnie prędkości przejazdu odcinków międzyprzystankowych w tych grupach zmieniają się istotnie

jedynie w przypadku odcinków dłuższych niż 350 [m] i krótszych niż 550 [m]. Odcinki krótsze i dłuższe od wymienionych zaliczono więc do tylko dwóch grup. W oparciu o te ustalenia możliwe było wyodrębnienie czterech typów odcinków, zróżnicowanych pod względem długości (przedziały: (150; 350]), (350; 450]), (450; 550], (550; 1250]). Porównanie prędkości przejazdu tramwajów dla powyższych typów odcinków zamieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Prędkości przejazdu tramwajów dla zdefiniowanych czterech typów odcinków między-przystankowych, zróżnicowanych pod względem długości

Typ odcinka	Zakres długości [m]	Liczba odcinków [-]	Prędkość przejazdu odcinka [km/h]				Grupy jednorodne wg testu Duncana
			Min	Max	Średnia	Odchylenie standardowe	
D1	[190-350]	33	14,3	29,5	22,4	3,6	X--
D2	(350-450]	24	13,7	32,5	23,9	4,9	XX
D3	(450-550]	26	15,7	35,4	26,0	5,8	--X
D4	(550-1244]	64	15,8	40,9	29,9	5,6	----X

Wyniki obliczeń potwierdziły oczekiwany wpływ długości odcinków na osiągnięte prędkości tramwajów korzystających z wydzielonych torowisk. Im dłuższy odcinek tym możliwości osiągnięcia wyższych prędkości są większe. Wykonane ponownie testy porównań wielokrotnych wskazały, że w przypadku odcinków typu D1 i D2 oraz odcinków typu D2 i D3 nie ma statystycznie istotnych różnic pomiędzy średnimi prędkościami przejazdu, są natomiast różnice pomiędzy D1 i D3. Jednak ponieważ różnica na poziomie 1,5 [km/h] jest intuicyjnie znacząca i może mieć istotne znaczenie w procesie modelowania makro-symulacyjnego – ostatecznie postanowiono utrzymać powyższy podział odcinków. Wykorzystanie tego podziału umożliwia lepsze odwzorowanie prędkości tramwajów w modelowaniu linii tramwajowych korzystających z wydzielonych torowisk.

3.2. Wpływ liczby skrzyżowań z sygnalizacją oraz występowania priorytetu na prędkość przejazdu tramwaju

Wydzielonym torowiskom w obrębie skrzyżowań niemal zawsze towarzyszy sygnalizacja świetlna, brak jej zastosowania na ogół świadczy o niskim wpływie pracy skrzyżowania na ruch tramwajów, które w tej sytuacji mają pierwszeństwo względem innych pojazdów. Pod uwagę wzięto ten sam zestaw 147 odcinków między-przystankowych, co w poprzedniej analizie, skupiający zarówno odcinki, na których nie ma żadnych skrzyżowań z sygnalizacją, jak również takie, na których zlokalizowano nawet 4 takie skrzyżowania. Przyjęto przy tym zasadę, że jeśli przystanek znajdujący się na początku odcinka znajduje się bezpośrednio na wlocie skrzyżowania, to skrzyżowanie to nie jest brane pod uwagę, gdyż straty czasu na nim ponoszone są uwzględniane w czasie postoju na przystanku, a nie w czasie przejazdu odcinka. Na części badanych odcinków, podczas prowadzonych

pomiarów były zapewnione priorytety dla tramwajów – co także uwzględniono w niniejszej analizie.

Rozróżniono przy tym dwa szczególne przypadki odcinków bez skrzyżowań z sygnalizacją świetlną: z uprzywilejowaniem oraz bez uprzywilejowania w sygnalizacji. Pozornie, te dwa typy odcinków nie różnią się od siebie, w praktyce już sam fakt uprzywilejowania na ciągu komunikacyjnym może wpływać na zachowania prowadzących tramwaje.

Uzyskano w ten sposób aż 10 typów odcinków, które można opisać dwójkami zmiennych: (0 skrzyżowań z sygnalizacją na odcinku; NIE ma priorytetu), (0; TAK), (1; NIE), (1; TAK), itd. Następnie, za pomocą analizy wariancji (na poziomie istotności 0,05) wykazano zasadność wprowadzenia klasyfikacji odcinków pod względem liczby skrzyżowań i występowania priorytetu w sygnalizacji. Okazało się jednak, że niektóre typy (z 3 lub 4 skrzyżowaniami) są reprezentowane przez zaledwie kilka odcinków. Dlatego dokonano agregacji typów – odcinki z dwoma, trzema lub czterema skrzyżowaniami połączono w grupy, które w ten sposób stały się liczniejsze. a w wyniku zastosowania testów porównań wielokrotnych, ostatecznie zaproponowano tylko 4 typy odcinków: (0; NIE), (1, NIE), (2, 3 i 4; NIE), (0, 1, 2, 3 i 4; TAK). Okazało się wówczas, że w przypadku występowania priorytetu w sygnalizacji – liczba skrzyżowań na odcinku nie ma statystycznie istotnego wpływu na średnią prędkość przejazdu tramwaju (tabela 3).

Tabela 3. Prędkości przejazdu dla czterech typów odcinków między-przystankowych, zróżnicowanych pod względem liczby skrzyżowań z sygnalizacją świetlną i występowania priorytetu dla tramwajów

Typ odcinka	Liczba skrzyżowań z sygnalizacją; priorytet	Liczba odcinków [-]	Prędkość przejazdu odcinka [km/h]				Grupy jednorodne wg testu Duncana
			Min	Max	Średnia	Odchylenie standardowe	
S1	0; NIE	45	18,2	35,4	26,0	4,6	--X--
S2	1; NIE	30	13,7	36,0	24,0	5,8	X----
S3	2-4; NIE	12	15,8	30,8	22,6	5,1	X----
S4	0-4; TAK	60	16,5	40,9	29,0	6,2	----X

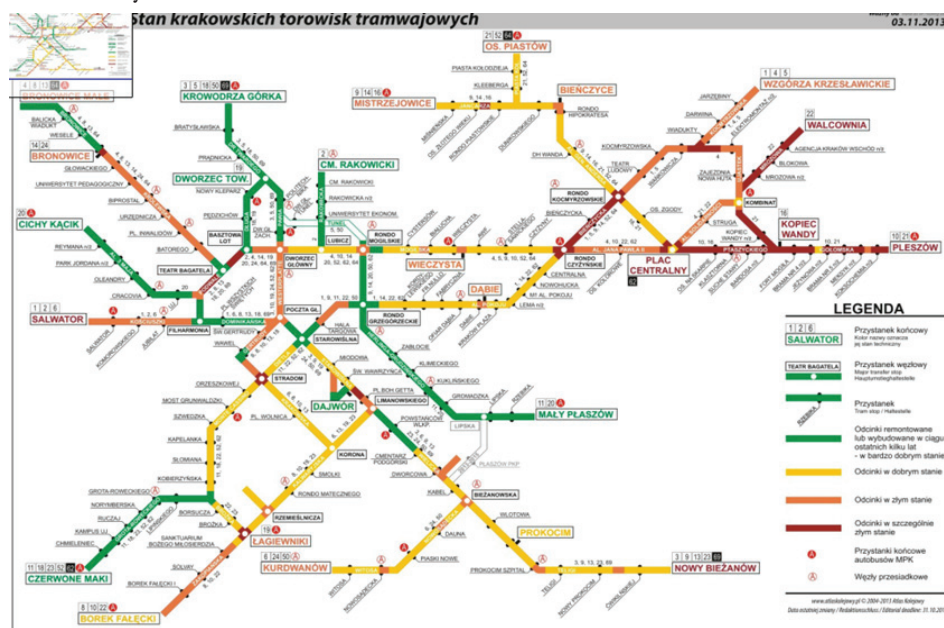
Średnia prędkość przejazdu na odcinkach z zapewnionym uprzywilejowaniem tramwajów w sygnalizacji jest zdecydowanie wyższa od prędkości osiąganych na odcinkach, na których priorytetu nie zapewniono. W przypadku jego braku, prędkość spada wraz ze wzrostem liczby skrzyżowań, co potwierdziło oczekiwania. Różnice pomiędzy prędkościami (choć statystycznie istotne) nie są jednak tak duże, jak można się było spodziewać.

3.3. Wpływ stanu technicznego torowiska na prędkość przejazdu tramwaju

Bieżąca ocena stanu technicznego torowisk jest zadaniem zarządcy infrastruktury tramwajowej i z uwagi na zakres oraz złożoność – zazwyczaj nie jest możliwa do wykonania w ramach prac przy budowie modelu. Ocena ta musi być wykony-

wana rzetelnie, z wykorzystaniem zaawansowanej aparatury, a jej ustalenia powinny prowadzić do rankingów torowisk, które z kolei stanowią podstawę planowania remontów. Efektem oceny mogą być też ograniczenia prędkości tramwajów, jeśli stan torowiska stwarza niebezpieczeństwo wykolejenia. Często też, prowadzący pojazdy sami ograniczają prędkość jazdy mimo braku takich ograniczeń.

W niniejszym artykule, oparto się na ogólnej, obiektywnej ocenie stanu torowisk w Krakowie, prowadzonej przez Zarząd Infrastruktury Komunalnej i Transportu [11]. W ocenie tej, stan torowiska jest określany jako: bardzo dobry, dobry, zły lub bardzo zły, przy czym stan bardzo dobry dotyczy właściwie tylko nowych torowisk, stan zły wiąże się z koniecznością punktowego lub odcinkowego spowolnienia ruchu tramwajów, a stan zły oznacza konieczność natychmiastowego remontu. Aktualną mapę stanu torowisk tramwajowych w Krakowie przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Mapa stanu torowisk tramwajowych w Krakowie, stan na dzień 3.11.2013r.

Źródło: <http://krmkrakow.atlaskolejowy.pl> [11]

Każdemu odcinkowi sieci, na którym prowadzono pomiary czasu przejazdu przyporządkowano jeden z powyższych stanów. Okazało się jednak, że różnice pomiędzy średnimi prędkościami osiąganymi na odcinkach z torowiskami w bardzo dobrym i dobrym stanie są statystycznie nieistotne. Prędkości osiągnięte na wielu torowiskach w dobrym stanie technicznym były wyższe niż na torowiskach, których stan był oceniany jako bardzo dobry. Podobny efekt dało porównanie prędkości w przypadku odcinków o złym lub bardzo złym stanie. Zatem i w tym przypadku konieczna była agregacja typów odcinków. Finalnie uzyskano więc tylko dwa typy odcinków, zróżnicowanych pod względem stanu technicznego – co obrazuje tabela 4.

Tabela 4. Prędkości przejazdu dla czterech typów odcinków między-przystankowych, zróżnicowanych pod względem stanu technicznego torowiska tramwajowego

Typ odcinka	Stan torowiska	Liczba odc. [-]	Prędkość przejazdu odcinka [km/h]			
			Min	Max	Średnia	Odchylenie standardowe
T1	Bardzo dobry, dobry	118	15,7	40,9	27,4	5,9
T2	Zły, bardzo zły	29	13,7	31,2	23,1	5,0

Wyniki porównania potwierdzają intuicyjnie wyczuwalny wpływ stanu torowiska na prędkości przejazdu tramwajów. Różnica jest znacząca również ze statystycznego punktu widzenia już na poziomie istotności 0,01, co potwierdził test istotności dla dwóch średnich (statystyka testu: $t=3,96$). I chociaż ryzykowne byłoby klasyfikowanie wydzielonych torowisk jedynie w oparciu o ich stan techniczny – to czynnik ten warto brać pod uwagę. Zastosowanie podobnego podziału jest możliwe także w innych miastach, pod warunkiem możliwości skorzystania z ogólnodostępnej, na bieżąco aktualizowanej mapy stanu torowisk.

3.4. Wpływ godzinowego natężenia ruchu tramwajów na prędkość przejazdu

W analizie średnich prędkości tramwajów uwzględniono także czynnik ruchowy, jakim jest godzinowe natężenie ruchu tramwajów. Na analizowanych 147 odcinkach krakowskiej sieci tramwajowej natężenia te (zgodnie z rozkładem jazdy) wynosiły 9, 15, 18, 24 i 27 [pociągów/godz]. Stosując testy porównań wielokrotnych ustalono, że nie ma istotnych różnic pomiędzy średnimi prędkościami tramwajów dla natężeń z przedziału [15; 24]. W ten sposób uzyskano tylko trzy typy odcinków, które zdefiniowano jako odcinki o: niskim ($Q \leq 9$), średnim ($9 < Q \leq 24$) oraz dużym ($Q > 24$) natężeniu ruchu tramwajów. Zgromadzona baza wyników pomiarów niestety nie objęła obserwacji na odcinkach najbardziej obciążonych ruchem tramwajów, powyżej 30 [poc/h]. Badania na takich odcinkach zostaną uzupełnione w przyszłości. Porównanie prędkości tramwajów z rozbiciem na wyżej zdefiniowane typy odcinków, zamieszczono w tabeli 5.

Tabela 5. Prędkości przejazdu dla czterech typów odcinków między-przystankowych, zróżnicowanych pod względem wielkości godzinowych natężeń ruchu tramwajów.

Typ odcinka	Natężenie ruchu tramwajów Q [poc/h]	Liczba odcinków [-]	Prędkość przejazdu odcinka [km/h]				Grupy jednorodne wg testu Duncana
			Min	Max	Średnia	Odchylenie standardowe	
Q1	$Q \leq 9$	25	17,8	40,9	29,0	6,7	--X
Q2	$9 < Q \leq 24$	80	13,7	36,3	26,8	5,5	XX
Q3	$Q > 24$	42	14,3	36,1	24,6	5,9	X--

Przyjęty podział odcinków pod względem natężeń ruchu tramwajów także okazał się zasadny, co potwierdził wynik testu analizy wariancji ($F=4,49$). Prędkości uzyskiwane przez tramwaje na słabo obciążonych torowiskach są najwyższe, co wynika z niskiego prawdopodobieństwa doganiania się i wzajemnego blokowania tramwajów, zarówno na odcinkach jak też w obrębie skrzyżowań i przystanków.

4. Łączny wpływ analizowanych czynników na prędkość przejazdu tramwaju po wydzielonym torowisku

Ustalenie łącznego wpływu analizowanych czynników na prędkości średnie tramwajów jest zdecydowanie trudniejsze. Jest to możliwe w sytuacjach klarownych, na przykład na długich odcinkach z priorytetami na skrzyżowaniach, będących w dobrym stanie technicznym, wykorzystywanych przez umiarkowane liczby tramwajów – prędkości będą wysokie. Problemy pojawiają się w sytuacji, gdy wpływ rozwiązań korzystnych jest niweczony przez inne wpływy, o negatywnym charakterze oddziaływania. Przykładowo, zastosowanie priorytetu w sygnalizacji na skrzyżowaniach nie przyniesie zbyt dużych korzyści, jeśli przejazd całego odcinka będzie powolny z powodu złego stanu torowiska.

Gdyby uwzględnić wszystkie możliwe przypadki łącznego oddziaływania badanych czynników, uzyskano by zbyt duże rozwarstwienie zgromadzonej próby badawczej, co całkowicie podważyłoby wiarygodność prowadzonych analiz. Z tego względu zrezygnowano z pełnej wieloczynnikowej analizy wariancji – liczebności znacznej części grup okazały się bardzo niskie. Z dużym prawdopodobieństwem można też stwierdzić, że nawet gdyby zgromadzono znacznie większą bazę odcinków, to użyteczność tak rozwarstwowionego zbioru prędkości dla potrzeb modelowania makrosymulacyjnego byłaby wątpliwa. Dlatego, mimo iż wykazano zróżnicowanie średnich prędkości przejazdu pod względem wszystkich czterech badanych czynników, postanowiono dokonać redukcji ich liczby. Analiza statystyczna ich łącznego wpływu wykazała, że zdecydowanie największy wpływ na średnią prędkość przejazdu mają: typ odcinka pod względem długości (31% zmienności), oraz typ odcinka pod względem liczby skrzyżowań z sygnalizacją (19%). Pozostałe czynniki są odpowiedzialne za mniej niż po 9% zmienności, silnie reprezentowany jest też czynnik losowy. Ostatecznie, zdecydowano więc o uwzględnieniu długości i liczby skrzyżowań na odcinku (tabela 6).

Tabela 6. Prędkości przejazdu dla odcinków między-przystankowych, zróżnicowanych pod względem długości oraz liczby skrzyżowań z sygnalizacją świetlną i występowania priorytetu dla tramwajów

Długość odcinka [m]	Liczba skrzyżowań z sygnalizacją; priorytet w sygnalizacji	Typ odcinka	Średnia prędkość przejazdu odcinka [km/h]
[190-350]	0-4; TAK	D1S4	23,6
	0; NIE	D1S1	22,9
	1; NIE	D1S2	19,2
(350-450]	0-4; TAK	D2S4	25,3
	0; NIE	D2S1	25,1
	1; NIE	D2S2	22,5
(450-550]	2-4; NIE	D2S3	21,1
	0-4; TAK	D3S4	27,2
	0; NIE	D3S1	26,9
>550	1; NIE	D3S2	23,4
	0-4; TAK	D4S4	32,0
	0; NIE	D4S1	30,1
	1; NIE	D4S2	29,7
	2-4; NIE	D4S3	22,9

Uzyskano w ten sposób 14 łącznych typów odcinków z wydzielonymi torowiskami. Zróżnicowanie średnich prędkości przejazdu odcinków może być wykorzystane dla potrzeb modelowania makrosymulacyjnego krakowskiej sieci tramwajowej, zwłaszcza w przypadku odcinków, na których nie ma wiarygodnych wyników pomiarów czasu przejazdu (stan obecny) oraz w przypadku odcinków planowanych. Wątpliwe są jedynie dwie z powyższych wartości, oznaczone kursywą. Zostały one wyznaczone na podstawie średnich prędkości przejazdu mniej niż 7 odcinków i chociaż wpisują się w logiczny ciąg malejący – to jednak muszą być traktowane z rezerwą.

5. Podsumowanie

Istnieje wiele czynników wpływających na czas przejazdu tramwajów po wydzielonych torowiskach. W artykule wykazano wpływ czterech z nich: długości odcinka, liczby skrzyżowań z sygnalizacją i zastosowanego priorytetu, stanu torowiska oraz natężenia ruchu tramwajów. We wszystkich przypadkach uzyskano istotne i logiczne zróżnicowanie średnich prędkości. Udało się również wykazać łączny wpływ długości odcinka i liczby skrzyżowań z sygnalizacją. Przedstawione średnie prędkości przejazdu odcinków mają charakter lokalny i mogą być wykorzystane jako narzędzie wspomagające budowę modelu sieci tramwajowej Krakowa. Zastosowanie wartości tych prędkości w budowie sieci innych miast byłoby ryzykowne. Jednak uzyskane prawidłowości zapewne udałoby się potwierdzić.

Prace będą kontynuowane, w kierunku opisu także innych rodzajów odcinków sieci tramwajowej, w tym odcinków z torowiskami wykorzystywanymi przez inne

pojazdy. Spowoduje to oczywiście znaczny rozrost tabeli ze średnimi czasami przejazdu – co będzie wymagało znalezienia algorytmu służącego do ich eksportu do programów makrosymulacyjnych, np. programu Visum. W przyszłości, badania zostaną rozszerzone na inne miasta, w których funkcjonuje komunikacja tramwajowa.

Bibliografia

- [1] Bauer M., Application of GPS Technology to Evaluate the Quality of Public Transport. Acta Technica Jaurinensis, Szechenyi Istvan University, Faculty of Engineering Sciences, Győr, Hungary, Vol 6, No 3 (2013).
- [2] Bauer M., Richter M., Weiss H., Simulation Model of Tram Route Operation. International Conference on the Applications of Computer Science and Mathematics in Architecture and Civil Engineering IKM 2009; Bauhaus University Weimar; Weimar 7-9.07.2009.
- [3] Dobosz M., Wspomagana komputerowo statystyczna analiza wyników badań. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [4] Hensher D., Button K., Handbook of Transport Modelling. Pergamon, Elsevier Ltd, Oxford 2005.
- [5] Molecki B. (red.), Nowoczesne tramwaje w komunikacji miejskiej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2004.
- [6] PTV A.G., Visum User Manual.
- [7] Sivakumar A., Modelling Transport: A Synthesis of Transport Modelling Methodologies. Imperial College London, 2007.
- [8] Szarata A., Modelowanie podróży wzbudzonych oraz tłumionych zmianą stanu infrastruktury transportowej. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Monografia, Inżynieria Lądowa, ISSN 0860-097X; Numer: 439.
- [9] Vuchic V.R., Urban Transit Systems and Technology. John Wiley & Sons, 2007.
- [10] Żochowska R., Karoń G., Macioszek E., Wyznaczanie macierzy podróży w sieciach miejskich – klasyfikacja i przegląd metod. Konferencja Naukowo-Techniczna Modelowanie podróży i prognozowanie ruchu, Zeszyty Naukowo-Techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczpospolitej Polskiej Oddział w Krakowie, Seria: Materiały konferencyjne, Nr 94, Zeszyt 153, Kraków 2010.
- [11] <http://kmmkrakow.atlaskolejowy.pl>.