

Analiza funkcjonowania systemu sterowania ruchem na ciągu tramwajowym Lipińskiego–Czerwone Maki w Krakowie^{1,2}

JAN ALEKSANDROWICZ

inż., student studiów II stopnia kierunku transport, specjalność systemy transportowe i logistyczne, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, e-mail: janekaleksandrowicz@gmail.com

KONRAD CHWASTEK

inż., student studiów II stopnia kierunku transport, specjalność systemy transportowe i logistyczne, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, e-mail: konradchwastek@o2.pl

Streszczenie. Artykuł porusza tematykę systemów sterowania ruchem, których wdrażanie na obszarach miejskich pozwala zwiększyć efektywność funkcjonowania komunikacji zbiorowej. Przeprowadzono badania, które miały na celu analizę wpływu funkcjonowania obszarowego systemu sterowania ruchem na płynność przejazdu tramwajów na odcinku od ulicy Lipińskiego do pętli Czerwone Maki. Założeniem na omawianym ciągu komunikacyjnym było uprzywilejowanie pojazdów komunikacji miejskiej poprzez nadawanie im priorytetu w ruchu. Podczas obserwacji odnotowywano zdarzenia związane z ruchem tramwajów oraz sytuacją na skrzyżowaniach, określając m.in. przyczynę zatrzymania pojazdu. W artykule przedstawiono ogólne wyniki dla całego ciągu dla poszczególnych okresów pomiarowych. Uzyskane dane posłużyły do obliczenia ilości zatrzymań tramwajów spowodowanych nieprawidłowym działaniem systemu. W oparciu o zebrane informacje wyznaczono również liczbę tramwajów pokonujących analizowany ciąg z określoną liczbą zatrzymań. Ponadto w artykule poruszono kwestie wpływu liczby zatrzymań na czas przejazdu badanego odcinka. Wyznaczono również koszt zużycia energii spowodowany przez zatrzymania tramwajów przed sygnalizatorami, z uwzględnieniem specyfikacji technicznych poruszającego się na analizowanym ciągu taboru. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż liczba zatrzymań oraz średni czas ich trwania znacznie odbiegają od założeń przyjętych podczas wdrażania systemu na badanym ciągu. Oznacza to, że system wymaga dopracowania, którego celem powinna być minimalizacja liczby i długości zatrzymań tramwajów. Ponadto przeprowadzone badania pokazują konieczność monitorowania parametrów pracy systemów sterowania ruchem w celu optymalizacji ich efektywności.

Słowa kluczowe: transport zbiorowy, priorytet, systemy sterowania ruchem

Wprowadzenie

Kraków jako drugie co do wielkości miasto Polski oraz jeden z największych ośrodków akademickich i turystycznych musi sprostać coraz większym wymaganiom dotyczącym obsługi komunikacyjnej. Z Kompleksowych Badań Ruchu z roku 2013 wynika, że Kraków jest miastem o charakterze policentrycznym. Oznacza to, że śródmieście jest celem znacznej liczby podróży realizowanych w krakowskiej aglomeracji. W stosunku do KBR z 2003 roku można zauważyć wyraźny wzrost znaczenia transportu indywidualnego kosztem komunikacji miejskiej (tabela 1).

Tabela 1

Podział zadań przewozowych w roku 2003 oraz 2013					
Kompleksowe Badania Ruchu	Komunikacja zbiorowa [%]	Samochód osobowy [%]	Ruch pieszy [%]	Rower [%]	Pozostałe [%]
2003	43	27	29	1	-
2013	36,3	33,7	28,4	1,2	0,4

Udział komunikacji zbiorowej w podziale zadań przewozowych zmniejszył się z 43% w roku 2003 do 36,3% w 2013 roku. Natomiast wzrosła liczba podróży realizowanych samochodem osobowym z 27% w 2003 roku do niespełna 34% w roku 2013 [1],[2]. Do przyczyn zaistniałej sytuacji można zaliczyć rosnący stopień zmotoryzowania mieszkańców Krakowa, który według najnowszych Kompleksowych Badań Ruchu wynosi 323 samochody na 1000 mieszkańców. Remont i wzrost przepustowości wielu ulic na ciągach umożliwiających dojazd oraz poruszanie się w obrębie centrum miasta mogły mieć przełożenie na częstsze korzystanie z samochodów osobowych przez mieszkańców Krakowa. Z kolei wzrost liczby pojazdów indywidualnych w sieci drogowej prowadzi do tworzenia się kongestii, która oddziałuje na funkcjonowanie komunikacji zbiorowej poza wydzielonymi korytarzami ruchu, zmniejszając jej konkurencyjność względem samochodu osobowego.

Obecnie pasażerowie komunikacji zbiorowej oczekują spełnienia określonych standardów w zakresie komfortu, dostępności usług, czasu oraz kosztów podróży. Koniecznością stało się wdrażanie nowoczesnych rozwiązań w zakresie infrastruktury, sterowania ruchem, obsługi pasażerskiej oraz najwyższej klasy taboru, a także integracja wszystkich tych elementów na terenie całej aglomeracji. Rozwiązaniem umożliwiającym ich powiązanie są systemy sterowania ruchem, które pozwalają zoptymalizować wykorzystanie potencjału komunikacji zbiorowej i zwiększyć jej konkurencyjność w stosunku do samochodu osobowego.

Obszarowy system sterowania ruchem w Krakowie

W 2005 roku rozpoczęto w Krakowie budowę systemu sterowania ruchem, którego zadaniem jest sterowanie sygnalizacjami świetlnymi i kontrola ich funkcjonowania, a także nadzór nad ruchem tramwajów. System Nadzoru Ruchu

¹ ©Transport Miejski i Regionalny, 2014.

² Wkład autorów w publikację: J. Aleksandrowicz 50%, K. Chwastek 50%.

Tramwajowego TTSS odpowiada również za sterowanie tablicami informacji pasażerskiej, a jego wdrożenie wiąże się z budową pierwszej linii Krakowskiego Szybkiego Tramwaju.

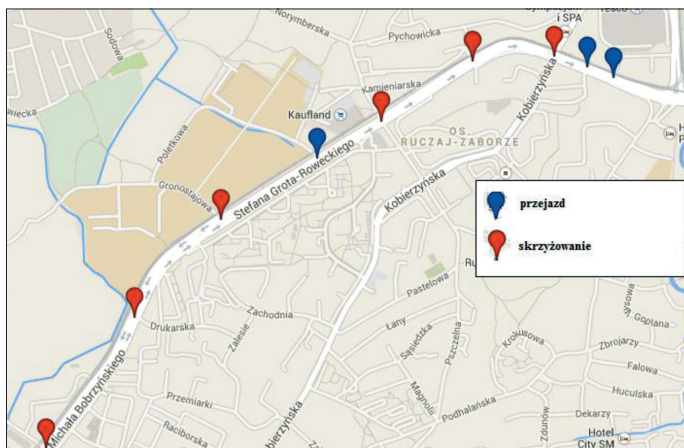
W 2012 roku oddano do użytku trasę tramwajową łączącą ulicę Brożka z pętlą Czerwone Maki, która zapewnia obsługę komunikacyjną osiedla Ruczaj i osiedla Europejskiego oraz Kampusu Uniwersytetu Jagiellońskiego. W ramach inwestycji wprowadzono system sterowania, którego założeniem było uprzywilejowanie pojazdów komunikacji miejskiej poprzez nadawanie im priorytetu w ruchu. Rozwiązanie to pozwala skrócić czas przemieszczenia się pasażera w danej relacji, przez co usługa staje się bardziej konkurencyjna względem transportu indywidualnego.

Przyznanie priorytetu komunikacji zbiorowej wiąże się z koniecznością detekcji i załączeniem na skrzyżowaniu odpowiedniej fazy. Uprzywilejowanie zbliżającego się pojazdu może nastąpić poprzez: wygenerowanie specjalnej dodatkowej fazy ruchu, wydłużenie sygnału zielonego, zmianę kolejności faz lub sterowanie dynamiczne w oparciu o minimalizację funkcji celu. Ponadto sterowniki lokalne muszą być ze sobą zintegrowane, umożliwiając w ten sposób sterowanie ruchem na danym obszarze [3].

Na ciągu tramwajowym od ulicy Brożka do pętli Czerwone Maki zastosowano podwójny system detekcji oparty na meldunkach wysyłanych przez autokomputery znajdujące się w tramwajach oraz pętle indukcyjne zlokalizowane w bezpośrednim sąsiedztwie sygnalizatorów przed skrzyżowaniami [4].

Badania funkcjonowania obszarowego systemu sterowania ruchem na ciągu komunikacyjnym Brożka–Czerwone Maki

Na przełomie maja i czerwca 2014 roku studenci Politechniki Krakowskiej – kierunku transport – przeprowadzili obserwacje, które miały na celu analizę funkcjonowania i wpływu Obszarowego Systemu Sterowania Ruchem na płynność przejazdu tramwajów przez skrzyżowania w ciągu drogowo–tramwajowym Lipińskiego–Czerwone Maki. Analizie zostało poddanych sześć skrzyżowań oraz trzy przejazdy tramwajowe, których lokalizację przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Lokalizacja punktów objętych badaniami w ciągu tramwajowym Lipińskiego–Czerwone Maki.

Pomiary we wszystkich zaznaczonych powyżej punktach przeprowadzono we wtorek i w czwartek w okresie porannym, tj. 6:30 – 9:00 oraz popołudniowym 14:30 – 17:00. Ponadto obserwacje były prowadzone w sobotę pomiędzy godziną 10:00 a 14:00. W okresach pomiarowych po analizowanym ciągu komunikacyjnym poruszała się największa liczba tramwajów, która dla dnia roboczego była równa 24 pojazdy na godzinę, a dla soboty 15 poj./h. Obserwatorzy odnotowywali zdarzenia związane z ruchem tramwajów oraz sytuacją na skrzyżowaniach, które pozwoliły na przeanalizowanie funkcjonowania systemu. W czasie pomiarów rejestrowano takie informacje jak m.in.: numery boczne pojazdów, godziny dojazdów i minięcia sygnalizatorów, zatrzymania przy peronie przystanku, a także przyczyny zatrzymań tramwajów. Zatrzymanie było klasyfikowane jako całkowite zahamowanie pojazdu i nie obejmowało powolnego toczenia się pociągu. W arkuszach pomiarowych zostały wyszczególnione następujące przyczyny zatrzymania:

- ruch relacji kolizyjnej – zatrzymanie tramwaju przed sygnalizatorem spowodowane było brakiem szczeliny pionowej wynikającym z ruchu relacji kolizyjnej;
- brak szczeliny pionowej – tramwaj mógł mieć przyznaną pionową szczelinę ze względu na ruch relacji niekolizyjnej, ale jej nie otrzymał;
- włączenie i wyłączenie szczeliny pionowej – tramwaj nie zdołał przejechać przez skrzyżowanie w przygotowanym oknie czasowym i odebranie szczeliny pionowej spowodowało gwałtowne hamowanie pojazdu;
- brak miejsca na przystanku – tramwaj zatrzymał się przed sygnalizatorem pomimo przyznanej szczeliny pionowej ze względu na brak miejsca przy skrajni peronu.

W przypadku, gdy nastąpiło zatrzymanie z przyczyn nie uwzględnionych w arkuszu, były one zamieszczane w rubryce „uwagi”.

Na podstawie uzyskanych danych przeprowadzono analizy i obliczono liczbę zatrzymań spowodowanych przez brak nadania priorytetu nadjeżdżającemu pojazdowi, a także wynikające z tego faktu koszt zużycia energii i wydłużenie przejazdu na badanym odcinku.

Ogólna prezentacja wyników przeprowadzonych badań

W czasie badań na ciągu tramwajowym Lipińskiego – Czerwone Maki uzyskano 5316 pomiarów na 15 punktach obserwacyjnych w obu kierunkach. Wyniki obserwacji zestawiono w tabeli 2.

W 968 przypadkach przejazd tramwaju był poprzedzony koniecznością zatrzymania przed sygnalizatorem, a w 654 przypadkach zwolnieniem. Tylko 69% tramwajów na badanym ciągu przejechało płynnie. Wynik ten świadczy o nierealizowaniu przez system założonych standardów, według których 90% przejazdów powinno odbywać się w sposób płynny bez zatrzymania³. System funkcjonował najbar-

³ Informacja uzyskana od Zarządu Infrastruktury Komunalnej i Transportu

dziej efektywnie w sobotę, kiedy na analizowanym ciągu poruszała się mniejsza niż w dzień roboczy liczba pociągów tramwajowych. Największą liczbę zatrzymań odnotowano w czwartek pomiędzy 6:30 a 9:00, gdzie stanowiły one niemal 22% wszystkich przejazdów w tym okresie pomiarowym. Również w tym okresie ruch tramwajów na badanym ciągu był najmniej płynny, ponieważ zaobserwowano 65,7% przejazdów bez żadnych utrudnień.

Wyniki pomiarów uwzględniające przyczyny unieruchomienia tramwaju zostały przedstawione w tabeli 3.

W 46 przypadkach obserwatorom nie udało się określić przyczyn zatrzymania, natomiast w 101 wypadkach unieruchomienie było spowodowane brakiem miejsca na przystanku i koniecznością oczekiwania przed sygnalizatorem. W ponad 83% przypadków zatrzymanie tramwaju było spowodowane nie przygotowaniem przez system priorytetu lub też błędną detekcją nadjeżdżającego pojazdu. W tabeli 3 nie uwzględniono zatrzymań zarejestrowanych na przejazdach tramwajowych, na których zgodnie z przyjętą metodologią pomiarów nie identyfikowano przyczyny zatrzymania. Dla trzech tego typu punktów pomiarowych odnotowano 71 zatrzymań. Odrzucając wyniki z nieokreśloną przyczyną oraz zatrzymania spowodowane brakiem miejsca na przystanku, wyznaczono liczbę zatrzymań determinowanych przez funkcjonowanie systemu, których liczba była równa 821⁴ (rys. 2).

Największa liczba zatrzymań systemowych była spowodowana brakiem szczeliny pionowej dla nadjeżdżającego pojazdu. Również ruch relacji kolizyjnej był przyczyną ponad 41% zatrzymań. Powodem tych zatrzymań może być brak detekcji spowodowany niedziałaniem jednego z elementów systemu. Ponadto częstotliwość kursowania tramwajów, która dla dni roboczych wyniosła 2,5 minuty dla jednego kierunku, mogła mieć przełożenie na odnotowany stan. Zakłócenia w ruchu tramwajów spowodowane zatrzymaniami na skrzyżowaniach powodują zmniejszanie odstępów czasu pomiędzy kolejnymi pociągami. Determinuje to sytuacje, w których pojazdy przekraczają poszczególne skrzyżowania w krótkich odstępach czasu. Wówczas system, uwzględniając nałożone ograniczenia, musi niejednokrotnie zatrzymać tramwaj, aby umożliwić ruch relacjom kolizyjnym.

W tabeli 4 przedstawiono liczbę zatrzymań spowodowanych przez system dla poszczególnych punktów pomiarowych dla obu obserwowanych kierunków.

W kierunku pętli Czerwone Maki najczęściej zatrzymań zdeterminowanych nieprawidłowym funkcjonowaniem systemu odnotowano na skrzyżowaniu ulic Grota-Roweckiego, Rostworowskiego i Norymberskiej. Niemal jedna czwarta wszystkich zatrzymań zarejestrowanych w tym kierunku miała miejsce w tym punkcie. Również w kierunku centrum miasta omawiane skrzyżowanie charakteryzuje się największą liczbą zatrzymań, która wyniosła 78. Z przedstawionych danych wynika, iż tylko skrzyżowanie ulic

Tabela 2

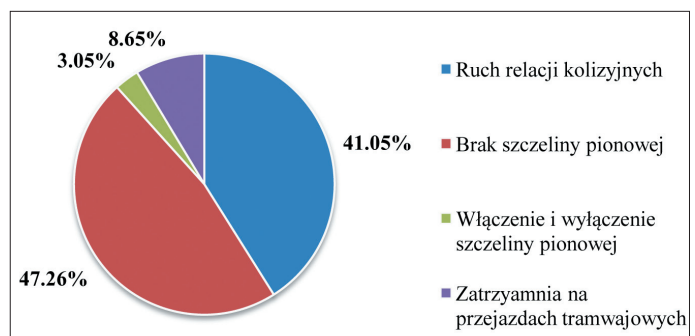
Wyniki pomiarów ruchu tramwajów							
Dzień	Okres pomiarowy	Płynny przejazd		Zwolnienie		Zatrzymanie	
		Liczba obserwacji	Udział procentowy [%]	Liczba obserwacji	Udział procentowy [%]	Liczba obserwacji	Udział procentowy [%]
		801	74,2	134	12,4	144	13,6
Wtorek	6:30–9:00	767	71,7	107	10,0	196	18,3
	14:30–17:00	736	69,6	139	13,1	183	17,3
Czwartek	6:30–9:00	693	65,7	131	12,4	231	21,9
	14:30–17:00	697	66,1	143	13,6	214	20,3
Zbiórce wyniki dla przeprowadzonych pomiarów		3694	69,5	654	12,3	968	18,2

Tabela 3

Liczba i procentowy udział zatrzymań z podziałem na ich przyczyny					
	Przyczyna zatrzymania				
	Ruch relacji kolizyjnej	Brak szczeliny pionowej	Włączenie i wyłączenie szczeliny pionowej	Brak miejsca na przystanku	Przyczyna nie została sklasyfikowana
Liczba zatrzymań	337	388	25	101	46
Udział procentowy [%]	37,6	43,3	2,8	11,3	5,1

Tabela 4

Liczba zatrzymań w punktach pomiarowych				
Punkt pomiarowy	Kierunek Czerwone Maki		Kierunek centrum miasta	
	Liczba zatrzymań	Udział procentowy [%]	Liczba zatrzymań	Udział procentowy [%]
Przejazd Hotel	5	1,2	8	2,1
Przejazd Golemo	4	0,9	55	14,3
Kobierzyńska	98	22,5	52	13,5
drogi osiedlowe	75	17,2	75	19,4
Norymberska	105	24,1	78	20,2
Łojasiewicza	0	0,0	0	0,0
Gronostajowa	65	14,9	34	8,8
Drukarska	6	1,4	6	1,6
Chmieleniec	78	17,9	78	20,2



Rys. 2. Udział procentowy poszczególnych przyczyn zatrzymań systemowych.

⁴ Liczba zatrzymań systemowych obejmuje zatrzymania na skrzyżowaniach i przejazdach tramwajowych

Bobrzyńskiego i Drukarskiej oraz przejazdu tramwajowe przy Hotelu Start oraz przez ulicę Łojasiewicza funkcjonowały optymalnie. Na pozostałych punktach odnotowano znaczące liczby zatrzymań przekraczające dopuszczalne wartości założone podczas wdrażania systemu. Należy zauważyć dużą liczbę zatrzymań w obu kierunkach na skrzyżowaniu ulicy Gorta-Roweckiego oraz dróg osiedlowych. Jest to skrzyżowanie, w obrębie którego nie ma zlokalizowanego przystanku, a wloty podporządkowane charakteryzują się niskimi wartościami natężenia ruchu w porównaniu do wlotów na innych skrzyżowaniach. Pomimo tego odnotowano po 75 zatrzymań w każdym z kierunków. Zauważono również dużą liczbę zatrzymań na przejeździe przy salonie Golemo w kierunku centrum miasta. Znacząco wyższa liczba zatrzymań w odniesieniu do pozostałych przejazdów wynika z faktu bliskiego sąsiedztwa sygnalizatora z peronem przystankowym. Sytuacja ta powoduje, że system odbiera meldunek, gdy tramwaj ruszy, a nie zawsze na tak krótkim odcinku zdąży przygotować szelkę pionową. W obu omawianych powyżej przypadkach przyczyną zatrzymań najprawdopodobniej jest nieefektywnie funkcjonująca detekcja pociągu tramwajowego.

Zatrzymania pociągów tramwajów na analizowanym ciągu

Otrzymane z pomiarów wyniki zestawiono w odniesieniu do poszczególnych pociągów tramwajowych i przeanalizowano liczbę zatrzymań dla całego analizowanego ciągu w obu kierunkach (tabela 5 oraz rys. 3 i 4).

Tramwaje jadące w kierunku pętli najczęściej zatrzymywały się jednokrotnie lub dwukrotnie na całym ciągu. Na 228 zarejestrowanych pojazdów tylko 29 tj. niespełna 13% z nich przejechało całą trasę bez żadnego zatrzymania. W przypadku pociągów poruszających się w kierunku centrum miasta na 231 zaobserwowanych tramwajów 48 przejechało bez zatrzymania, co stanowi około 21%. Zaobserwowano nieznacznie większą liczbę pojazdów zatrzymujących się jednokrotnie oraz znacząco niższą wartość dwu i trzykrotnych zatrzymań.

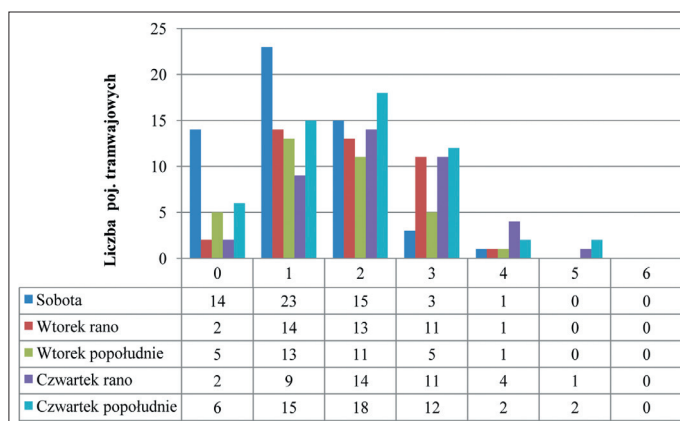
W kierunku pętli Czerwone Maki w dni robocze przejazdów bez zatrzymań było o wiele mniej niż w sobotę. Ponadto w okresach porannych było mniej zatrzymań niż w popołudniowych. Również w sobotę zostało zrealizowanych najwięcej przejazdów z jednym zatrzymaniem. W dni robocze pociągi najczęściej zatrzymywały się jeden lub dwa razy. Widać również, że w czwartek tramwaje zatrzymywały się o wiele częściej niż we wtorek.

Również w kierunku centrum miasta widoczny jest najwyższy udział soboty w przejazdach bez żadnego lub z jednym zatrzymaniem. Dla dni roboczych rośnie udział przejazdów z jednym lub dwoma zatrzymaniami. W kierunku centrum miasta można także zauważyć nieznacznie większą liczbę zatrzymań w czwartek niż we wtorek. Należy również zauważyć, iż w czwartkowym porannym okresie pomiarowym zarejestrowano przejazd z aż sześcioma zatrzymaniami.

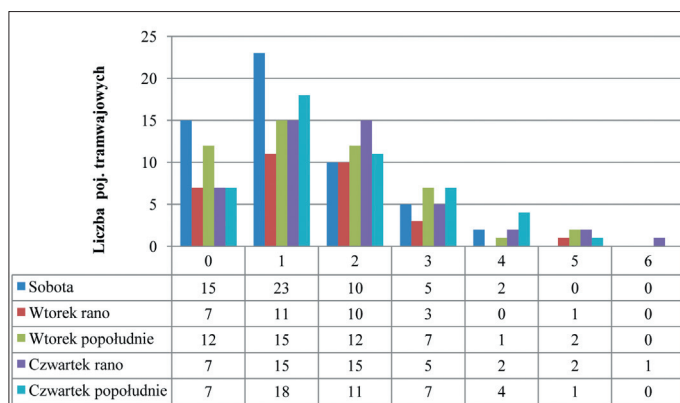
Porównując dane z tabeli oraz wykresów, można zauważyć, że ruch tramwajów poruszających się z pętli do cen-

Tabela 5

Liczba zatrzymań pociągów tramwajowych przejeżdżających badanym ciągiem tramwajowym dla całego okresu pomiarowego		
	Kierunek Czerwone Maki	Kierunek centrum miasta
Punkt pomiarowy	Średnie czasy trwania zatrzymań [s]	
Przejazd Hotel	7,00	5,63
Przejazd Golemo	15,25	7,47
Kobierzyńska	14,69	16,10
drogi osiedlowe	12,19	14,55
Norymberska	19,62	24,09
Łojasiewicza	0,00	0,00
Gronostajowa	13,56	17,85
Drukarska	11,33	6,00
Chmieleniec	13,97	13,36
Średnia dla kierunku	15,02	15,41



Rys. 3. Liczba zatrzymań pociągów tramwajowych przejeżdżających badanym ciągiem tramwajowym dla poszczególnych okresów pomiarowych – kierunek pętla Czerwone Maki.



Rys. 4. Liczba zatrzymań pociągów tramwajowych przejeżdżających badanym ciągiem tramwajowym dla poszczególnych okresów pomiarowych – kierunek centrum miasta.

trum miasta w odniesieniu do kierunku przeciwnego jest bardziej płynny. Ponadto przy mniejszej liczbie pociągów na godzinę na analizowanym ciągu ruch jest bardziej płynny niż w dni robocze, w których częstotliwość kursowania jest wyższa.

Zauważono, że system efektywniej zarządza ruchem pojazdów opuszczających pętlę, ponieważ zachowane są odstępy pomiędzy kolejnymi tramwajami wynikające z rozkładu jazdy. Natomiast w przypadku pociągów pojawiających się na ciągu z centrum miasta występują dużo większe fluktuacje i dyspersja odstępów pomiędzy kolejnymi tram-

wajami. Taka sytuacja powoduje wzrost skomplikowania sterowania ruchem, co znajduje odzwierciedlenie w większej niż w kierunku przeciwnym liczbie zatrzymań. Zależność ta występuje jednak tylko w dni robocze, gdzie częstotliwość kursowania wynosi 24 poj./h. W sobotę, podczas której częstotliwość kursowania jest niższa, system działa efektywniej w porównaniu do dnia roboczego.

Wpływ zatrzymań na wydłużenie czasu podróży

Na podstawie zebranych danych zbadano również czasy trwania zatrzymań systemowych (tabela 6), a także ich wpływ na wydłużenie czasu podróży.

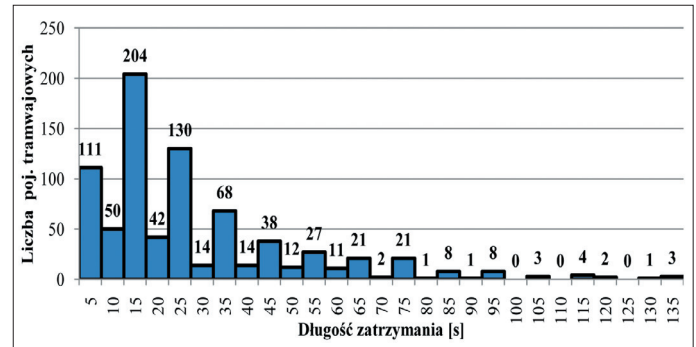
Zauważono, że pojazdy dłużej oczekiwały na przyznanie szczeliny pionowej na skrzyżowaniach niż na przejazdach. Ponadto najdłuższe średnie czasy trwania zatrzymań odnotowano na skrzyżowaniach o dużej liczbie relacji i dużym natężeniu ruchu z wlotów podporządkowanych tj. Norymberska oraz Kobierzyńska. Przyczyną takiej sytuacji najprawdopodobniej są skomplikowane sytuacje ruchowe, które przekładają się na złożoność obliczeniową systemu. Należy jednak zauważyć stosunkowo długie zatrzymania tramwajów na skrzyżowaniu z drogami osiedlowymi. Charakteryzuje się ono małymi natężeniami ruchu relacji kolizyjnych dla tramwaju, a pomimo tego pociągi w tym miejscu często i na długo zatrzymują się przed sygnalizatorami. Przyczynami takiej sytuacji są najprawdopodobniej błędy w detekcji oraz źle określone punkty meldunkowe. Analizując średnie czasy zatrzymań dla obu kierunków, można z wysokim prawdopodobieństwem stwierdzić, że są znacząco wyższe od założonych (5 sekund).

Dla lepszego zobrazowania czasu trwania zatrzymań determinowanych niewłaściwym funkcjonowaniem systemu dane przedstawiono w postaci szeregu rozdzielczego przedziałowego o szerokości klas 5 sekund i przedstawiono na rysunku 5.

Zatrzymania pomiędzy 11 a 15 sekund występowały najczęściej, 204 razy. Zaledwie 14% zatrzymań trwało krócej niż 5 sekund, a zgodnie z założonymi standardami dłuższe postoje nie powinny mieć miejsca⁵. Zauważono zatrzymania trwające blisko lub ponad 2 minuty, co stanowi 30,5% średniego czasu przejazdu analizowanego ciągu, który jest równy 6 minut 34 sekundy. Ponadto tak długie zatrzymania nie są incydentami, ponieważ przykładowo odnotowano cztery zatrzymania trwające między 111 a 115 sekund oraz trzy pomiędzy 131 a 135 sekund. Przyczyną bardzo długiego czasu oczekiwania tramwaju przed sygnalizatorem mogła być błędna detekcja lub jej brak. Również powodem długiego zatrzymania mogło być zmniejszanie się odstępów pomiędzy poszczególnymi tramwajami i przekraczanie skrzyżowań w krótkich odstępach czasu przez co system, uwzględniając ograniczenia, nie mógł przygotować pionowej szczeliny dla każdego z nadjeżdżających pociągów.

Wykorzystując dane otrzymane z obserwacji dotyczące średniego czasu trwania zatrzymania, średniej liczby za-

Średnie czasy trwania zatrzymań na poszczególnych punktach pomiarowych w obu kierunkach				
Liczba zatrzymań	Czerwone Maki		Centrum miasta	
	Liczba tramwajów		Udział procentowy [%]	
0	29	12,7	48	20,8
1	74	32,5	82	35,5
2	71	31,1	58	25,1
3	42	18,4	27	11,7
4	9	3,9	9	3,9
5	3	1,3	6	2,6
6	0	0,0	1	0,4
Suma	228	100,0	231	100,0



Rys. 5. Liczba zatrzymań pociągów tramwajowych w poszczególnych przedziałach czasowych.

trzymania, a także różnicy pomiędzy średnim czasem dojazdu do przystanku przy płynnym przejeździe oraz zatrzymaniu dla każdego z kierunków określono średnią stratę czasu determinowaną przez funkcjonowanie systemu. W obliczeniach pominięto czasy zatrzymań spowodowanych przez brak miejsca na przystankach oraz bez określonej przyczyny. Dla obu kierunków średnia strata czasu wynosiła: 30,1 sekundy w kierunku pętli Czerwone Maki oraz 29,8 sekundy w kierunku centrum miasta. Otrzymany w ten sposób wynik stanowi niespełna 8% średniego czasu przejazdu analizowanego ciągu. Zatem można stwierdzić, że liczba i długość zatrzymań nie ma większego wpływu na punktualność tramwajów poruszających się badanym ciągiem.

Analiza kosztów zatrzymań

Na podstawie liczby zatrzymań na badanym ciągu tramwajowym oraz informacji dotyczących ilości zużywanego energii przez pociągi tramwajowe na wozokilometr (tabela 7) wyliczono koszty ponownego rozpędzenia wagonu po zatrzymaniu. Do analizy przyjęto liczbę zatrzymań, których przyczyną była zależna od funkcjonowania systemu. W obliczeniach nie uwzględniono liczby zwolnień, ponieważ część z tramwajów kursujących po badanym ciągu jest wyposażona w urządzenia umożliwiające proces rekuperacji energii. Wówczas pojazdy podczas hamowania magazynują energię i mogą ją wykorzystać ponownie do rozpędzenia się. W przypadku zatrzymania pociągu w specyficznych sytuacjach prąd jest przekazywany do znajdujących się w bliskim sąsiedztwie tramwajów, lecz najczęściej przekazywany jest do oporników.

⁵ Informacja uzyskana od Zarządu Infrastruktury Komunalnej i Transportu

Tabela 7

Zużycie energii przez poszczególne rodzaje taboru na wozokilometr		
L.p.	Typ wagonu	Jednostkowe zużycie energii [kWh/wozokm]
1.	N8	3,2
2.	EU8N	3,2
3.	NGT6	3,5
4.	GT8S	3,5
5.	E1C3	3,6
6.	pojedynczy wagon 105Na	3,2

Przy obliczeniu kosztów wszystkich zatrzymań odnotowanych na badanym odcinku sieci tramwajowej przyjęto następujące założenia⁶:

- jako pojazd ekwiwalentny przyjęto wagon 105Na, dla którego znany był sposób wyliczenia kosztu dla pojedynczego zatrzymania;
- jako koszt 1 kWh przyjęto stawkę oferowaną przez Tauron Polska Energia dla Krakowa w wysokości 0,57 zł (stan na 1.08.2014 r.).

Po przeprowadzeniu wstępnych obliczeń otrzymano ostateczny wzór, w którym zmienną jest koszt 1 kWh:

$$Koszt_{\text{odk.}} = 566,1554 \cdot Koszt_{\text{kWh}}$$

gdzie 566,1554 jest liczbą kWh, które zostały zużyte do ponownego rozpędzenia wagonów.

Po podstawieniu założonego kosztu 1 kWh otrzymano wynik 322,71 zł. Należy nadmienić, że jest to koszt jedynie dla 14 godzin przeprowadzonych obserwacji, z czego w ciągu 10 godzin tramwaje kursowały ze zwiększoną częstotliwością 24 pociągów/h. Prognozując koszt na cały rok, przyjęto założenia:

- 200 dni, w których w ciągu 6 godzin na dobę w jednym kierunku na badanym ciągu porusza się 24 pojazdy/h – założenie wynika ze zwiększonej częstotliwości kursowania linii 52 lub linii zastępczej 70 w dni robocze;
- 200 dni, w których w ciągu 10 godzin w ciągu doby tramwaje kursują ze stałą częstotliwością 18 pojazdów/h – w godzinach poza szczytem komunikacyjnym w dni robocze;
- 150 dni, w których tramwaje kursują z częstotliwością 15 pojazdów/h – przyjęto, że w soboty i święta kursy są realizowane przez 16 godzin z jednakową częstotliwością;
- przyjęto na podstawie wcześniejszych obliczeń średnie zużycie energii wykorzystywanej w ciągu jednej godziny do ponownego rozpędzenia wagonu na poziomie 28,30 kWh dla 15 pociągów/h, 33,97 kWh dla 18 pociągów/h oraz 45,29 kWh dla 24 pociągów/h w jednym kierunku.

⁶ Informacje dotyczące algorytmu uzyskano dzięki współpracy z Miejskim Przedsiębiorstwem Komunikacji SA w Krakowie

Dzięki powyższym założeniom wyznaczono przewidywane zużycie energii, spowodowane dodatkowymi zatrzymaniami, dla całego roku na poziomie 190 228,22 kWh, co daje koszt 108 430,08 zł przy uwzględnieniu założonej stawki za 1 kWh. Należy zaznaczyć, że jest to koszt dla odcinka, na którym funkcjonuje Obszarowy System Sterowania Ruchem. Ponieważ system nie został jeszcze wprowadzony w obrębie całej sieci tramwajowej nie można oszacować kosztów zużytej energii dla całej sieci tramwajowej.

Podsumowanie

Wdrażanie systemów sterowania ruchem pozwala zwiększyć efektywność funkcjonowania transportu zbiorowego. Przeprowadzona analiza obszarowego systemu sterowania ruchem wdrożonego na ciągu tramwajowym Lipińskiego – Czerwone Maki w Krakowie wykazała konieczność monitorowania parametrów jego pracy w celu poprawy wykrytych w czasie badań przypadków nieprawidłowego funkcjonowania. Zmierzona liczba zatrzymań oraz średni czas ich trwania znacznie odbiegają od założeń przyjętych podczas wdrażania systemu. Do przyczyn można zaliczyć błędy w detekcji pojazdów oraz zbyt małe odstępy czasu pomiędzy kolejnymi tramwajami. Prowadzą one do sytuacji, w których system, aby spełnić nałożone ograniczenia, nie może przyznać szczeliny pionowej pociągom przekraczającym skrzyżowanie w krótkich odstępach czasu, co powoduje zatrzymanie tramwaju. Oznacza to, że system wymaga jeszcze dopracowania, którego celem powinna być minimalizacja liczby i długości zatrzymań tramwajów na analizowanym ciągu. Przewiduje się, iż wdrożenie systemu sterowania ruchem na ulicach Kapelanka i Monte Cassino, które nastąpiło po zrealizowaniu omawianych badań, przyczyni się do bardziej płynnego ruchu w kierunku pętli Czerwone Maki. Koszty większego zużycia energii rzędu 110 tysięcy zł rocznie na 3,8 kilometrowym odcinku torowiska pokazują, jak ważne jest maksymalne wykorzystanie potencjału systemów sterowania ruchem. Należy pamiętać, że minimalizacja liczby zatrzymań znajdzie przełożenie nie tylko w kosztach zużytej energii, ale również w zużyciu eksploatacyjnym taboru i poprawi komfort podróży pasażerów. Dalsza rozbudowa i rozwój systemów sterowania ruchem są kluczowe dla zapewnienia obsługi komunikacyjnej aglomeracji krakowskiej o wysokim standardzie, która będzie konkurencyjna względem transportu indywidualnego.

Literatura

1. *Kompleksowe Badania Ruchu 2013 w Krakowie*, raport końcowy.
2. *Zintegrowany plan rozwoju transportu publicznego dla Krakowa na lata 2007 ÷ 2013*.
3. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., *Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka*, WKiŁ, Warszawa 2011.
4. 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.
5. Aleksandrowicz J., Bryniarska Z., Chwastek K., Bieniasz Ł. z zespołem, *Ocena wpływu funkcjonowania Obszarowego Systemu Sterowania Ruchem na płynność przejazdu tramwajów przez skrzyżowanie w ciągu drogowo-tramwajowym Lipińskiego–Czerwone Maki*, Politechnika Krakowska, Kraków 2014.