

ANALIZA FUNKCJONOWANIA SYSTEMU STEROWANIA RUCHEM NA CIĄGU TRAMWAJOWYM LIPIŃSKIEGO-CZERWONE MAKI W KRAKOWIE¹

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. *W opracowaniu przedstawiono wyniki badań, które miały na celu analizę wpływu funkcjonowania obszarowego systemu sterowania ruchem na płynność przejazdu tramwajów na odcinku od ulicy Lipińskiego do pętli Czerwone Maki w Krakowie. Uzyskane dane posłużyły do obliczenia liczby zatrzymań tramwajów spowodowanych nieprawidłowym działaniem systemu. Ponadto w pracy poruszono kwestie wpływu liczby zatrzymań na czas przejazdu badanego odcinka. Wyznaczono również koszt zużycia energii zdeterminowany przez zatrzymania tramwajów przed sygnalizatorami z uwzględnieniem specyfikacji technicznych poruszającego się na analizowanym ciągu taboru.*

Słowa kluczowe: *uprzywilejowanie komunikacji zbiorowej, systemy sterowania ruchem, komunikacja tramwajowa*

1. 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 (KBR) z roku 2013 wynika, że miasto ma charakter policentryczny. Oznacza to, że śródmieście jest celem znacznej liczby podróży realizowanych w krakowskiej aglomeracji. W stosunku do wyników KBR z 2003 roku można zauważyć wyraźny wzrost znaczenia transportu indywidualnego kosztem komunikacji miejskiej (tab. 1).

¹ Wkład autorów w publikację: J. Aleksandrowicz 50%, K. Chwastek 50%.

Tabela 1. Podział zadań przewozowych w roku 2003 oraz 2013

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

Źródło: opracowanie własne

Udział podróży realizowanych publicznym transportem zbiorowym w ostatniej dekadzie zmalał, co było efektem zwiększenia się udziału podróży realizowanych transportem indywidualnym [1,2]. Do przyczyn zaistniałej sytuacji można zaliczyć rosnący wskaźnik zmotoryzowania mieszkańców Krakowa, który wg najnowszych Kompleksowych Badań Ruchu wynosi 323 samochody na 1000 mieszkańców. Modernizacji i wzrost przepustowości wielu ulic umożliwiających dojazd oraz poruszanie się w obrębie centrum miasta mogły mieć przełożenie na częstsze korzystanie z samochodów osobowych przez mieszkańców Krakowa. Efektem tego zjawiska jest tworzenie się kongestii, która oddziałuje na funkcjonowanie komunikacji zbiorowej poza wydzielonymi korytarzami ruchu, zmniejszając jej konkurencyjność względem samochodu osobowego.

Obecnie pasażerowie publicznego transportu zbiorowego oczekują spełnienia określonych standardów w zakresie warunków podróży, m.in.: komfortu, dostępności usług, czasu oraz kosztów podróży. Koniecznością stało się wdrażanie nowoczesnych rozwiązań w zakresie infrastruktury, sterowania ruchem, obsługi pasażerskiej oraz wymianę starego nieatrakcyjnego taboru na nowoczesny, przyjazny dla pasażerów i środowiska. Samo jednak wdrażanie nowoczesnych technologii na dłuższą metę nie przynosi efektu, dlatego integracja wszystkich tych elementów na terenie całej aglomeracji stała się priorytetem. Rozwiązaniem umożliwiającym zintegrowanie wszystkich wdrażanych rozwiązań i innowacji są systemy sterowania ruchem, które pozwalają zoptymalizować wykorzystanie potencjału komunikacji zbiorowej i zwiększyć jej konkurencyjność w stosunku do samochodu osobowego.

2. Obszarowy system sterowania ruchem w Krakowie

W 2005 r. rozpoczęto w Krakowie wdrażanie systemu sterowania ruchem, którego zadaniem jest zarządzanie sygnalizacjami świetlnymi oraz kontrola ich funkcjonowania. Dodatkowo został wprowadzony System Nadzoru Ruchu Tramwajowego TTSS odpowiadający za sterowanie tablicami informacji pasażerskiej, a jego wdrożenie związane było z utworzeniem pierwszej linii Krakowskiego Szybkiego Tramwaju.

W 2012 r. oddano do użytku trasę tramwajową łączącą ulicę Brożka z pętlą Czerwone Maki, która poprawiła obsługę komunikacyjną osiedla Ruczaj wraz z Kampusem Uniwersytetu Jagiellońskiego. W ramach inwestycji wprowadzono system sterowania ruchem, którego założeniem było uprzywilejowanie tramwajów poprzez nadawanie im priorytetu w ruchu. Rozwiązanie to pozwala skrócić czas

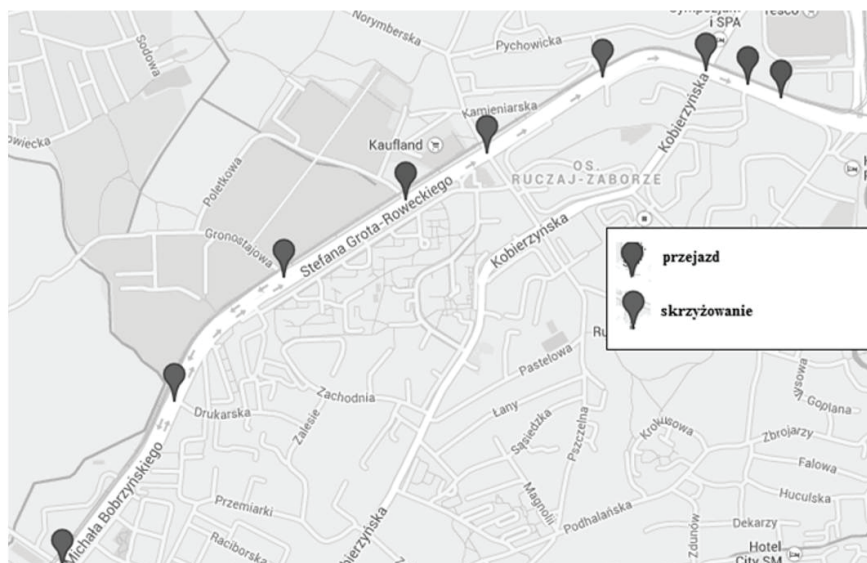
przemieszczenia się pasażera w danej relacji, przez co usługa staje się bardziej konkurencyjna względem transportu indywidualnego.

Przyznanie priorytetu pociągom tramwajowym wiąże się z koniecznością detekcji i załączeniem bezkolizyjnego przejazdu przez skrzyżowanie lub przejazd tramwajowy. 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. Najważniejsze jest jednak to, by sterowniki lokalne były 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, podstawowy oparty na meldunkach wysyłanych przez autokomputery znajdujące się w tramwajach oraz rezerwowi, wykorzystujący pętle indukcyjne zlokalizowane pomiędzy szynami bezpośrednio przed sygnalizatorami tramwajowymi [4].

3. Pomiary funkcjonowania obszarowego systemu sterowania ruchem na ciągu komunikacyjnym Brożka-Czerwone Maki

Pod koniec maja i na początku czerwca 2014 roku studenci Politechniki Krakowskiej z kierunku transport przeprowadzili obserwacje mające 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 lokalizacja została przedstawiona na rys. 1.



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

Źródło: opracowanie własne na podstawie <https://www.google.pl/maps>

Pomiary we wszystkich zaznaczonych powyżej punktach przeprowadzono w dwa dni robocze: we wtorek i w czwartek w okresie porannym (w godzinach: 6:30 - 9:00) oraz popołudniowym (w godzinach: 14:30 - 17:00). Ponadto obserwacje były prowadzone także w sobotę w godzinach: 10:00 - 14:00. Powodem wyboru wyżej opisanych okresów pomiarowych była najwyższa częstotliwość kursowania tramwajów w obu kierunkach na badanym ciągu komunikacyjnym (48 pojazdów/h w dni powszednie oraz 30 pojazdów/h w sobotę). Obserwatorzy na arkuszach pomiarowych odnotowywali m.in. zdarzenia związane z ruchem tramwajów oraz sytuacją na skrzyżowaniach. Pozwoliło to na przeanalizowanie funkcjonowania systemu sterowania ruchem. W czasie pomiarów rejestrowano informacje takie jak: numery boczne pojazdów, godziny dojazdów i minięcia sygnalizatorów, zatrzymania przy peronie przystanku, a także przyczyny zatrzymań tramwajów przed sygnalizatorem. Zatrzymanie zostało sklasyfikowane jako całkowite wyhamowanie pojazdu i nie obejmowało powolnego toczenia się po ciągu. W arkuszach pomiarowych zostały wyszczególnione następujące przyczyny zatrzymania:

- ruch relacji kolizyjnej – zatrzymanie tramwaju przed sygnalizatorem spowodowane brakiem szczeliny pionowej wynikającym z ruchu relacji kolizyjnej;
- brak szczeliny pionowej na sygnalizatorze – zatrzymanie tramwaju spowodowane brakiem szczeliny pionowej mimo możliwości bezkolizyjnego przejazdu;
- włączenie i wyłączenie szczeliny pionowej – zatrzymanie tramwaju spowodowane zmianą szczeliny pionowej na poziomą, tuż przed jadącym pojazdem, wymuszającą gwałtowne hamowanie tramwaju;
- brak miejsca na przystanku – zatrzymanie tramwaju przed sygnalizatorem spowodowane przez brak miejsca na przystanku (trwająca wymiana pasażerów wcześniej jadącym pojeździe).

W przypadku, gdy nastąpiło zatrzymanie z przyczyn nieuwzględnionych w arkuszach pomiarowych, w rubryce «uwagi» wpisywano stosowne do sytuacji objaśnienia.

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

4. Wyniki przeprowadzonych badań

Podczas pomiarów na ciągu tramwajowym Lipińskiego - Czerwone Maki uzyskano 5316 obserwacji na 15 punktach pomiarowych w obu kierunkach. Otrzymane wyniki zestawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Wyniki pomiarów ruchu tramwajów na ciągu Lipińskiego - Czerwone Maki

<i>Dzień</i>	<i>Okres pomiarowy</i>	<i>Płynny przejazd</i>		<i>Zwolnienie</i>		<i>Zatrzymanie</i>	
Sobota	10:00-14:00	801	74,24%	134	12,42%	144	13,35%
Wtorek	6:30-9:00	767	71,68%	107	10,00%	196	18,32%
	14:30-17:00	736	69,57%	139	13,14%	183	17,30%
Czwartek	6:30-9:00	693	65,69%	131	12,42%	231	21,90%
	14:30-17:00	697	66,13%	143	13,57%	214	20,30%
Zbiorcze wyniki dla przeprowadzonych pomiarów		3694	69,49%	654	12,30%	968	18,21%

Źródło: opracowanie własne

W 968 przypadkach przejazd tramwaju był poprzedzony koniecznością zatrzymania przed sygnalizatorem, a w 654 przypadkach zwolnienia. Ponad 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 zatrzymania niezależnie od dnia tygodnia oraz godziny². System funkcjonował najefektywniej w sobotę, kiedy na analizowanym ciągu poruszała się mniejsza niż w dzień roboczy liczba pociągów tramwajowych. Najwięcej utrudnień w ruchu tramwajów zaobserwowano w czwartek pomiędzy 6:30 a 9:00, odnotowano wtedy największą liczbę zatrzymań (niemal 22% wszystkich przejazdów) oraz najmniejszą liczbę płynnych przejazdów (65,7% wszystkich przejazdów).

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

Tabela 3. Liczba i procentowy udział zatrzymań z podziałem na ich przyczyny

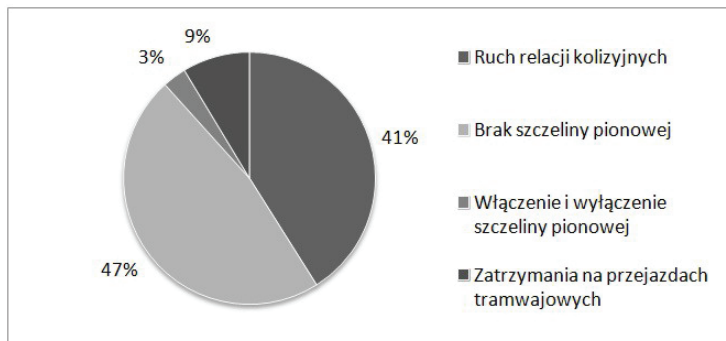
	<i>Przyczyna zatrzymania</i>				
	<i>Ruch relacji kolizyjnej</i>	<i>Brak szczeliny pionowej</i>	<i>Włączenie i wyłączenie szczeliny pionowej</i>	<i>Brak miejsca na przystanku</i>	<i>Przyczyna nie została sklasyfikowana</i>
Liczba zatrzymań	337	388	25	101	46
Udział procentowy [%]	37,57	43,26	2,79	11,26	5,13

Źródło: opracowanie własne

Obserwacje wykazały, że w ponad 83% przypadków zatrzymanie tramwaju było spowodowane nieprzygotowaniem przez system priorytetu lub też błędną detekcją nadjeżdżającego pojazdu. Około 5% zatrzymań nie zostało zidentyfikowanych przez obserwatorów, a w 101 przypadkach unieruchomienie było spowodowane brakiem miejsca na przystanku i koniecznością oczekiwania przed sygnalizatorem. 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 pomia-

2 Informacja uzyskana od Zarządu Infrastruktury Komunalnej i Transportu

rowych odnotowano 71 zatrzymań. Odrzucając wyniki z nieokreśloną przyczyną oraz zatrzymania spowodowane brakiem miejsca na przystanku wyznaczono liczbę zatrzymań spowodowanych funkcjonowaniem sygnalizacji świetlnej, która wyniosła 821³ (rys. 2).



Rys. 2. Udział procentowy poszczególnych przyczyn zatrzymań systemowych

Źródło: opracowanie własne

Największa liczba zatrzymań systemowych (determinowanych funkcjonowaniem systemu) była spowodowana brakiem szczeliny pionowej dla nadjeżdżającego pojazdu. Drugą ważną przyczyną była obsługa relacji kolizyjnej, stanowiąc ponad 41% zatrzymań. Powodem tych zatrzymań mógł być brak detekcji spowodowany błędnym funkcjonowaniem jednego z elementów systemu. Zakłócenia w ruchu tramwajów spowodowane zatrzymaniami na skrzyżowaniach powodują zmniejszanie odstępów czasu pomiędzy kolejnymi pociągami. Prowadzi to do sytuacji, w których pojazdy przejeżdżają poszczególne skrzyżowania w krótkich odstępach czasu. Wówczas system, uwzględniając nałożone ograniczenia, musi niejednokrotnie zatrzymać tramwaj, aby umożliwić ruch relacjom kolizyjnym.

Liczbę zatrzymań spowodowanych przez system sterowania dla poszczególnych punktów pomiarowych w obu obserwowanych kierunkach przedstawiono w tabeli 4.

Tabela 4. Liczba zatrzymań w punktach pomiarowych

Punkt pomiarowy	Kierunek: Czerwone Maki		Kierunek: centrum miasta	
	Liczba zatrzymań	Udział procentowy [%]	Liczba zatrzymań	Udział procentowy [%]
1 Przejazd Hotel	5	1,15	8	2,07
2 Przejazd Golemo	4	0,92	55	14,25
3 Kobierzyńska	98	22,48	52	13,47
4 drogi osiedlowe	75	17,20	75	19,43
5 Norymberska	105	24,08	78	20,21
6 Łojasiewicza	0	0,00	0	0,00
7 Gronostajowa	65	14,91	34	8,81
8 Drukarska	6	1,38	6	1,55
9 Chmieleniec	78	17,89	78	20,21

Źródło: opracowanie własne

3 Liczba zatrzymań systemowych obejmuje zatrzymania na skrzyżowaniach i przejazdach tramwajowych

W obu kierunkach najczęściej zatrzymań spowodowanych nieprawidłowym funkcjonowaniem systemu odnotowano na skrzyżowaniu ulic Grota-Roweckiego, Rostworowskiego i Norymberskiej. Ponad 20% wszystkich zaobserwowanych zatrzymań miało miejsce na tym skrzyżowaniu. Z przedstawionych danych wynika, iż tylko skrzyżowanie ulic Bobrzyńskiego i Drukarskiej oraz przejazdy tramwajowe przy Hotelu Start oraz przez ulicę Łojasiewicza funkcjonowały optymalnie. Na pozostałych punktach odnotowano znaczące liczby zatrzymań przekraczające dopuszczalne wartości założone w umowie wdrażania systemu. Problem, jaki został zauważony, to duża liczba zatrzymań w obu kierunkach na skrzyżowaniu ulicy Grota-Roweckiego oraz dróg osiedlowych. Jest to skrzyżowanie, w obrębie którego nie ma zlokalizowanego przystanku, a podporządkowane wloty charakteryzują się bardzo niskimi wartościami natężenia ruchu w porównaniu do wlotów na innych skrzyżowaniach. Pomimo tego odnotowano po 75 zatrzymań w każdym z kierunków jazdy. Zauważono również, że duża liczba zatrzymań na przejeździe przy salonie Golemo (punkt nr 2) w kierunku centrum miasta może być spowodowana bliskim sąsiedztwem sygnalizatora z peronem przystankowym. Sytuacja ta powoduje, że system odbiera meldunek, gdy tramwaj ruszy, a nie zawsze na tak krótkim odcinku zdąży przygotować szczelinę pionową. W obu omawianych powyżej przypadkach przyczyną zatrzymań najprawdopodobniej jest nieefektywnie funkcjonująca detekcja pociągu tramwajowego.

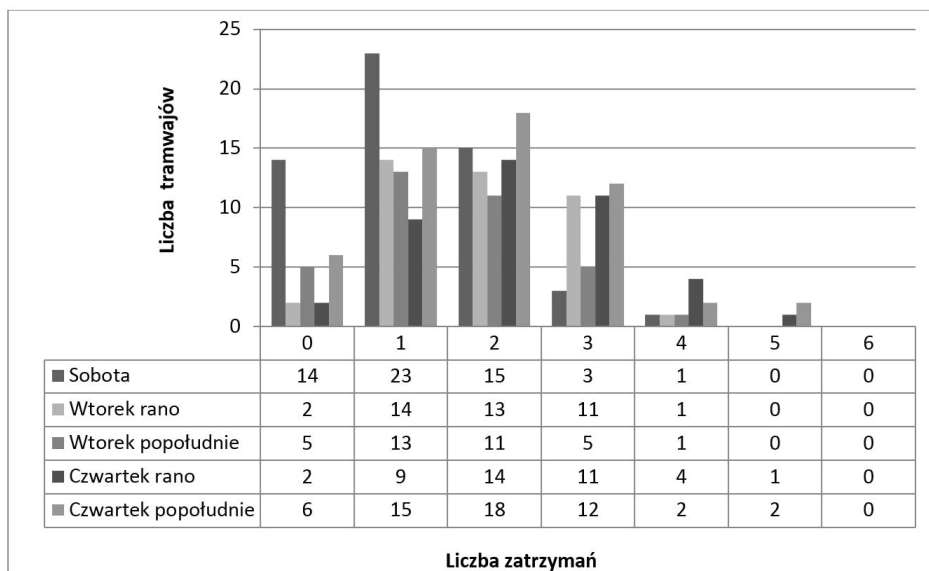
5. Zatrzymania pociągów tramwajowych na analizowanym ciągu

Wykonane pomiary pozwoliły przeprowadzić analizę przejazdów tramwajów w obu kierunkach w odniesieniu do poszczególnych pociągów tramwajowych. Dzięki temu udało się wyznaczyć liczbę tramwajów, które nie zatrzymały się ani razu oraz te, którym zdarzało się to nawet kilkukrotnie podczas jednego przejazdu (tab. 5 oraz rys. 3 i 4).

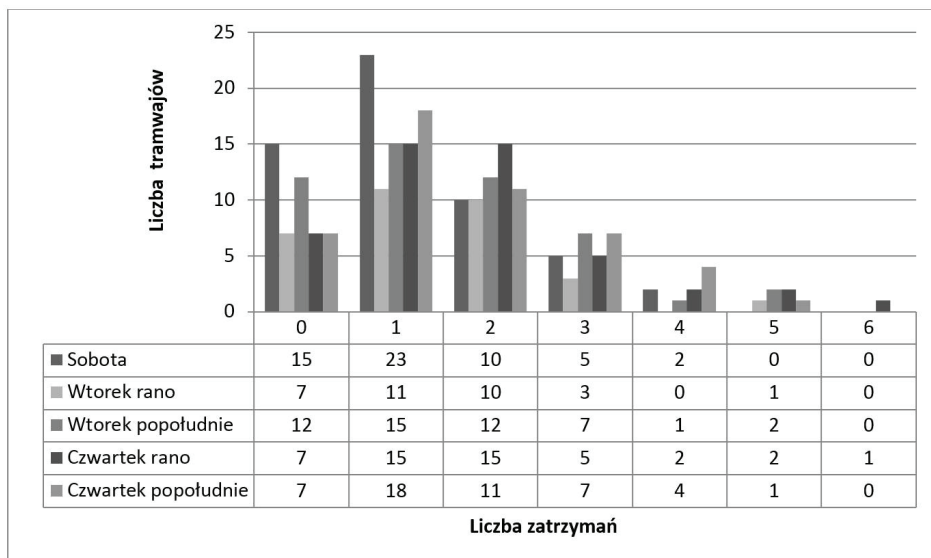
Tabela 5. Liczba zatrzymań pociągów tramwajowych przejeżdżających badanym ciągiem tramwajowym dla całego okresu pomiarowego

Liczba zatrzymań	Kierunek: Czerwone Maki		Kierunek: centrum miasta	
	Liczba i procentowy udział tramwajów			
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		231	

Źródło: opracowanie własne



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



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

Tramwaje jadące w kierunku pętli Czerwone Maki najczęściej zatrzymywały się jednokrotnie (32,5% ogólnej liczby zatrzymań) lub dwukrotnie (31,1%) na całym ciągu. Na 228 zarejestrowanych pojazdów tylko 29, tj. niespełna 13% z nich, przejechało całą trasę bez żadnego zatrzymania. W przypadku pociągów porusza-

jących się w kierunku centrum miasta na 231 zaobserwowanych tramwajów 48 przejechało bez zatrzymania, co stanowi ok. 21%. Zaobserwowano nieznacznie większą liczbę pojazdów zatrzymujących się jednokrotnie (35,5% ogólnej liczby zatrzymań) oraz znacząco niższą wartość dwu (25,1%) i trzykrotnych (11,7%) zatrzymań.

W kierunku pętli Czerwone Maki w dni robocze liczba przejazdów bez zatrzymania była o połowę mniejsza niż w sobotę. Ponadto w okresach porannych dochodziło do mniejszej liczby zatrzymań niż w popołudniowych. W sobotę zostało również zrealizowanych najwięcej przejazdów z jednym zatrzymaniem. W dni robocze pociągi najczęściej zatrzymywały się jeden lub dwa razy. Widać także, że w czwartek tramwaje zatrzymywały się o wiele częściej niż we wtorek.

Również w kierunku centrum miasta w soboty przejazdy odbywały się najczęściej bez żadnego lub z jednym zatrzymaniem. W dni robocze 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 aż z sześcioma zatrzymaniami.

Porównując dane z tabeli oraz wykresów można zauważyć, że ruch tramwajów poruszających się z pętli do centrum miasta w odniesieniu do kierunku przeciwnego jest bardziej płynny. Ponadto przy mniejszej liczbie pociągów na godzinę na analizowanym ciągu ruch odbywa się sprawniej niż w dni robocze, w których częstotliwość kursowania jest wyższa.

Zauważono, że system efektywniej zarządza ruchem pojazdów opuszczających pętlę, ponieważ zachowane są odstępy czasu 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 czasu pomiędzy kolejnymi tramwajami. 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, gdy częstotliwość kursowania wynosi 24 poj./h (w godzinach szczytu porannego i popołudniowego). W sobotę, podczas której częstotliwość kursowania jest niższa, system działa efektywniej niż w dniach roboczych.

6. Wpływ zatrzymań na wydłużenie czasu podróży

Wykonane pomiary umożliwiły zanalizowanie czasu 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 rucho-

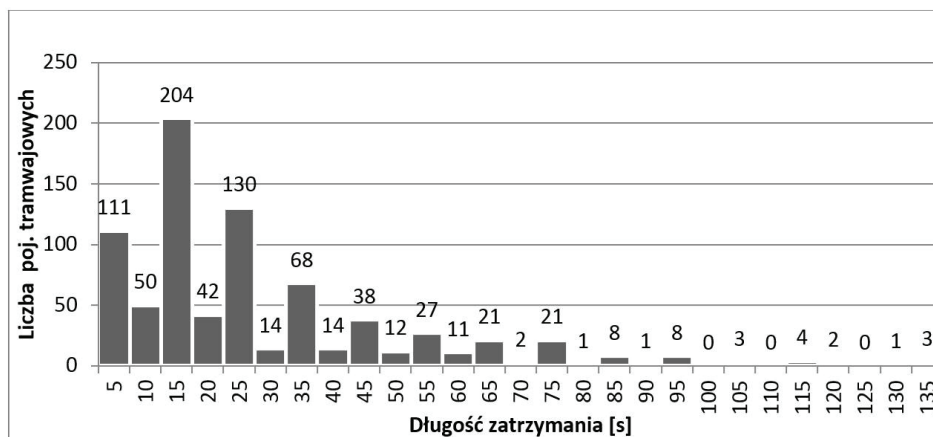
we oraz założone ograniczenia (m.in. minimalny czas trwania każdej z faz), które przekładają się na złożoność obliczeniową systemu. Należy jednak zauważyć stosunkowo długie zatrzymania tramwajów na skrzyżowaniu z drogami osiedlowymi. Charakteryzuje się ono małymi natężeniami ruchu relacji kolizyjnych 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 stwierdzić, że są trzykrotnie wyższe od założonych dopuszczalnych (5 sekund).

Tabela 6. Średnie czasy trwania zatrzymań na poszczególnych punktach pomiarowych w obu kierunkach

Punkt pomiarowy	Kierunek Czerwone Maki	Kierunek centrum miasta
	Średni czas trwania zatrzymania [sekundy]	
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
Średniadla kierunku	15,02	15,41

Źródło: opracowanie własne

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 rys. 5.



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

Źródło: opracowanie własne

Zatrzymania pomiędzy 11 a 15 sekund występowały najczęściej, bo aż 204 razy. Zaledwie 14% zatrzymań trwało krócej niż 5 sekund, a zgodnie z założonymi standardami dłuższe postoje nie powinny mieć miejsca⁴. Zauważono także zatrzymania trwające blisko lub ponad 2 minuty, co stanowi 30,5% średniego czasu przejazdu analizowanym ciągiem, który jest równy 6 min 34 sek. 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. Jedną z przyczyn bardzo długiego czasu oczekiwania tramwaju przed sygnalizatorem mógł być błąd zgłoszenia tramwaju w systemie lub jego brak. Warto także zauważyć, że wydłużony czas zatrzymania mógł być związany ze zmniejszonymi odstępami pomiędzy poszczególnymi tramwajami i przekraczanie skrzyżowań w krótkich odstępach czasu.

Wykorzystując dane otrzymane z obserwacji dotyczące średniego czasu trwania zatrzymania, średniej liczby zatrzymań, a także różnicy pomiędzy średnim czasem dojazdu do przystanku przy płynnym przejeździe oraz zatrzymaniu dla każdego z kierunków określono średnią stratę czasu generowaną przez funkcjonowanie systemu. W obliczeniach pominięto czasy zatrzymań spowodowanych przez brak miejsca na przystankach oraz bez określonej przyczyny. Dla obu kierunków średnia łączna 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 analizowanym ciągiem. Zatem można stwierdzić, że liczba i czas zatrzymań nie ma większego wpływu na punktualność tramwajów kursujących do pętli Czerwone Maki.

7. Analiza kosztów zatrzymań

Na podstawie liczby zatrzymań na badanym ciągu tramwajowym oraz informacji dotyczących ilości zużywanej energii przez pociągi tramwajowe na wozokilometr (tab. 7) wyliczono koszty ponownego rozpędzenia wagonu po zatrzymaniu. Do analizy przyjęto liczbę zatrzymań, których przyczyna 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 jest tracony w opornikach.

4 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

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych otrzymanych od MPK S.A. w Krakowie

Przy obliczeniu kosztów wszystkich zatrzymań odnotowanych na badanym odcinku sieci tramwajowej przyjęto następujące założenia⁵:

- 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 22.09.2014 r.).

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

$$Koszt_{całk.} = 566,1554 * Koszt_{kWh} \quad (1)$$

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

Po podstawieniu założonego kosztu 1 kWh otrzymano łączny koszt zużycia energii w wyniku zatrzymań pociągów tramwajowych przed sygnalizatorami o wysokości 322,71 zł. Należy nadmienić, że jest to koszt poniesiony jedynie w ciągu 14 godzin przeprowadzonych obserwacji, z czego w ciągu 10 godzin tramwaje kursowały z 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 pojazdów/h - założenie wynika z 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

⁵ Informacje dotyczące algorytmu uzyskano dzięki współpracy z Miejskim Przedsiębiorstwem Komunikacji S.A. w Krakowie

na poziomie 28,3077 kWh dla 15 pociągów/h, 33,9693 kWh dla 18 pociągów/h oraz 45,2924 kWh dla 24 pociągów/h w jednym kierunku.

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 jednego z odcinków, na którym funkcjonuje Obszarowy System Sterowania Ruchem. Ponieważ system nie został jeszcze wprowadzony w obręb całej sieci tramwajowej nie można oszacować kosztów zużytej energii dla całej sieci tramwajowej.

8. Podsumowanie

Wdrażanie systemów sterowania ruchem pozwala zwiększyć efektywność funkcjonowania transportu zbiorowego. Przeprowadzone badania obszarowego systemu sterowania ruchem wdrożonego na ciągu tramwajowym Lipińskiego – Czerwone Maki w Krakowie wykazały konieczność monitorowania parametrów jego pracy w celu wyeliminowania w przyszłości wykrytych w czasie badań przypadków nieprawidłowego funkcjonowania. Zaobserwowana liczba zatrzymań oraz średni czas ich trwania, znacznie odbiegają od standardów określonych w umowie wdrożenia systemu. Wśród przyczyn zatrzymań można wyróżnić błędy w detekcji pojazdów oraz znaczącą nieregularność kursowania tramwajów. Prowadzą one do sytuacji, w których system, aby spełnić nałożone ograniczenia musiałby wstrzymać ruch w relacjach kolizyjnych na wiele minut, co ze względu na określone ograniczenia długości cyklu nie może mieć miejsca. 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 ul. Kapelanka i Monte Cassino, które nastąpiło już po zrealizowaniu omawianych badań przyczyni się do bardziej płynnego ruchu w kierunku pętli Czerwone Maki. Koszty większego zużycia energii rzędu 110 tys. zł rocznie na 3,8 km 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 oraz 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.

Bibliografia

- [1] Kompleksowe Badania Ruchu 2013 w Krakowie.

-
- {2] Zintegrowany plan rozwoju transportu publicznego dla Krakowa na lata 2007÷2013, s. 9.
 - {3] Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., Inżynieria ruchu drogowego. Teoria i praktyka, WKiŁ, Warszawa 2011, s. 374-389.
 - {4] Gryga Ł., Wojtaszek M., Firlejczyk G., Obszarowy system sterowania ruchem i nadawanie priorytetu dla transportu zbiorowego w Krakowie. TMiR, 6/2013.