

# Analiza odcinków generujących straty czasu w transporcie tramwajowym

Jacek Szmagliński



mgr inż. Jacek Szmagliński

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska

jacszmag@pg.gda.pl

Największym atutem transportu tramwajowego jest jego wysoka zdolność przewozowa, przy stosunkowo niewielkich kosztach inwestycyjnych i operacyjnych. Klasyczna sieć autobusowa dysponuje znaczącą mniejszymi możliwościami przewozowymi. Budowa od podstaw systemu Bus Rapid Transit, o podobnej do tramwaju przepustowości, wymaga nakładów porównywalnych z budową linii tramwajowej, przy czym koszty operacyjne są wielokrotnie wyższe w przypadku systemu BRT [13].

Aby system transportowy był atrakcyjny dla potencjalnych klientów – pasażerów, spełnione muszą zostać podstawowe postulaty przewozowe dotyczące czasu i warunków podróży [14]. Większość z nich związana jest z zagadnieniami ekonomii transportu, jednak projektant infrastruktury ma wpływ na czas przejazdu związany z prędkością handlową pojazdów oraz komfort jazdy związany z kształtowaniem układu geometrycznego. Zwiększanie prędkości może wiązać się jednak ze zmniejszeniem komfortu jazdy, dlatego najważniejszym zadaniem projektanta powinno być określenie prędkości normatywnej, pozwalającej na przejazd trasy z zachowaniem odpowiedniego komfortu pasażerów oraz oszacowanie strat czasu składających się na wydłużenie czasu przejazdu ponad wynikający z prędkości normatywnej. Analiza powyższych czynników może stać się bazą do stworzenia optymalnego rozkładu jazdy lub koncepcji przebudowy infrastruktury. Dodatkowe koszty poniesione w czasie analizy i optymalizacji w dłuższym czasie mogą przyczynić się do zwiększenia liczby pasażerów a więc poprawy rentowności przewozów pasażerskich [6].

## Studium przypadku

Już na początku lat sześćdziesiątych, w Polsce zastanawiano się w jaki sposób efektywnie przyspieszyć transport tramwajowy. W tym celu planowano budowę nowych, bezkolizyjnych tras, a na trasach istniejących możliwie największe odseparowanie ruchu tramwajów od pozostałych użytkowników drogi. Likwidowano również linie tramwajowe biegnące przez ścisłe, historyczne centra miast, które nie pozwalały na podniesienie bardzo niskiej prędkości komunikacyjnej 6-8 km/h (średnia prędkość przejazdu liczona razem z czasem obsługi przystanków

[11]). Powyższe działania pozwoliły znacznie przyspieszyć tramwaj klasyczny, wydzielony z ruchu ulicznego, z 12-13 do 18-20 km/h. [10]. W Gdańsku proces ten rozpoczął się w roku 1959, kiedy trasę Śródmiejską z ulicy Długiej (Główne Miasto, historyczna zabudowa) przerzucono na nowobudowaną ulicę Podwałe Przedmiejskie, a zakończono w 1995 roku przekładając ostatnie odcinki tej samej trasy z ulic Łąkowej i Długie Ogrody na dalszą część ulicy Podwałe Przedmiejskie [15].

W ostatnich latach gdańska sieć tramwajowa przeszła kompleksową modernizację. Oddano do użytku dwie nowe linie, łączące centrum miasta z dzielnicami południowymi. Do ich obsługi została skierowana między innymi linia tramwajowa numer 11, która obecnie łączy największe dzielnice Gdańska - od Zaspy, przez Przymorze, Żabiankę, Oliwę, Wrzeszcz, Śródmieście do Chełmu.

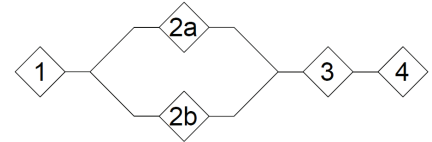
Obecnie w Gdańsku ponad 85% tras tramwajowych stanowią linie wydzielone. Na linii nr 11, stosunek ten jest jeszcze wyższy, gdyż aż 96,4% trasy (15,9 km) jest wydzielone, a 12,7 % (2,1 km) przebiega po trasie bezkolizyjnej, projektowanej jako tramwaj szybki (prędkość komunikacyjna 25-27 km/h).

Pomimo zakrojonych na szeroką skalę prac [5], nie udało się globalnie przyspieszyć ruchu tramwajów, a nawet, na poszczególnych odcinkach, czas przejazdu wydłużył się.

## Algorytm postępowania

Aby ustalić przyczyny niewielkiej skuteczności rozwiązań separacyjnych w Gdańsku (rozkładowa prędkość komunikacyjna na linii 11 wynosi 18,3 km/h, dla porównania linia autobusowa 148 rozkładowo osiąga prędkość komunikacyjną 19,8 km/h na porównywalnym odcinku), należy znaleźć przyczyny i miejsca powstawania największych strat czasu, oraz określić maksymalną możliwą do osiągnięcia prędkość. Zaproponowany algorytm postępowania określono na rysunku 1.

1. Analiza czasu jazdy, dla linii idealnej, tzn. bez wpływu łuków poziomych na prędkość oraz braku zatrzymań na trasie.
2. Analiza czasu jazdy dla linii rzeczywistej, w idealnym stanie technicznym. Złożenie stanów 2a oraz 2b, pozwala na określenie maksymalnej możliwej do osiągnięcia prędkości komunikacyjnej, w istniejącym stanie geometrycznym i funkcjonalnym, która może być określona jako prędkość normatywna [7].  
2a. Linia idealna, bez wpływu łuków, pochyłeń oraz rozjazdów na prędkość jazdy, z założeniem zatrzymywania pojazdu na przystankach. Pozwala na określenie strat dynamicznych powstających z uwagi na



1. Schemat algorytmu postępowania

rozruch i hamowanie, oraz strat statycznych z uwagi na postoje na przystankach. 2b. Linia o rzeczywistych parametrach geometrycznych, ale bez uwzględnienia zatrzymań na przystankach. Pozwala na określenie strat dynamicznych z uwagi na wolniejsze pokonywanie łuków oraz rozjazdów.

3. Analiza strat czasu powstających podczas przejazdu przez odcinki o ograniczonej prędkości maksymalnej, nie wynikającej z układu geometrycznego trasy (np. zły stan nawierzchni, brak widoczności itp.). Pozwala na określenie rzeczywistej maksymalnej prędkości komunikacyjnej.
4. Analiza strat czasu powstających podczas zatrzymań, nie wynikających z optymalnego czasu obsługi przystanków (np. postój przed sygnalizacją świetlną, wydłużona obsługa przystanku, ręczne przekładanie zwrotnicy, zator itp.).

Sumaryczne straty czasu, powstające w czasie przejazdu, określamy odejmując rzeczywisty czas przejazdu, od czasu uzyskanego w kroku 1. Analogicznie, aby określić straty czasu wynikające ze złego stanu nawierzchni, należy odjąć od czasu jazdy z kroku 3, czas jazdy z kroku 2.

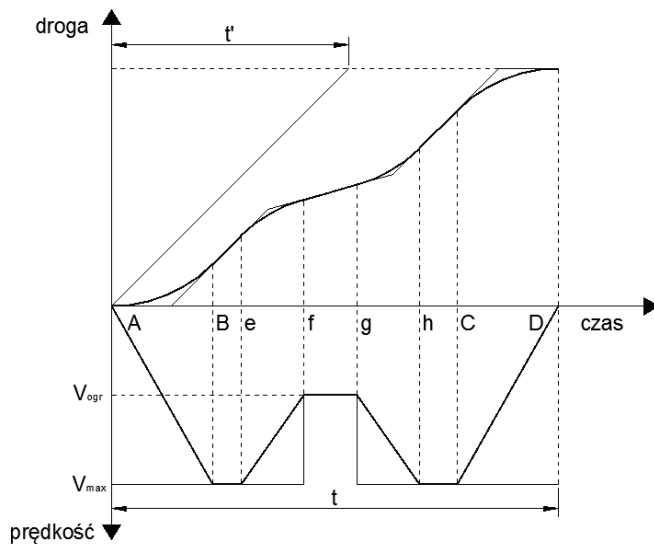
Zestawiając następnie ten prosty model, z modelem ekonomicznym – kosztów ponoszonych na redukcję odpowiednich strat czasu, można zbudować analizę kosztów przyspieszenia ruchu i wybrać wariant optymalny. Określono już ponad wszelką wątpliwość [8], że najtańszą i przynoszącą najlepsze rezultaty metodą ograniczenia strat jest metoda usprawnienia systemu sterowania ruchem.

## Obliczenia trakcyjne

Teoretyczną analizę czasu przejazdu można dokonać na wiele sposobów. Czas jazdy pociągów na szlaku można obliczyć za pomocą dwóch przykładowych metod [9]:

- metoda obliczeń uproszczonych,
- metoda oparta na prawach dynamiki pociągów.

Dla obliczeń kolejowych, w ruchu pociągów bardzo istotne jest zmniejszanie się siły pociągowej lokomotywy oraz wzrost oporów wagonów wraz ze wzrostem prędkości. Szczególnie dotyczy się to ciężkich pociągów towarowych, oraz szybkich składów pasażerskich. Dla lekkich



2. Wykres drogi i prędkości w funkcji czasu, dla uproszczonego modelu ruchu (opracowanie własne na podstawie [9])

i stosunkowo powolnych pojazdów, jakimi są tramwaje, można z dużą dokładnością założyć, że przyspieszenie rozruchu jest stałe, niezależnie od prędkości jazdy (do prędkości nieco ponad 30 km/h przybliżenie to jest zgodne z rzeczywistością, nawet dla przestarzałych wagonów 105Na, gdyż przy tej prędkości następuje w nich przełączenie rozruchu na bezoporowy). Z powyższych powodów, do obliczeń czasów jazdy tramwajów, jako najprostszą, a jednocześnie dobrze przybliżającą przejazd rzeczywisty, została wybrana metoda uproszczona.

W wybranej metodzie, pojazd przedstawia się jako punkt materialny, poruszający się na drodze pomiędzy punktami zatrzymania. Długość pojazdu uwzględniono tworząc tablicę ograniczeń prędkości. Pojazd może znajdować się w trzech stanach:

- ruch jednostajny,
- ruch przyspieszony bądź opóźniony,
- postój w punkcie zatrzymania.

Założono, że po ruszeniu (punkt A) pojazd porusza się z jednostajnym przyspieszeniem, aż do osiągnięcia prędkości maksymalnej (B), po czym porusza się ruchem jednostajnym. W następnym kroku (C) rozpoczyna się hamowanie, aż do zatrzymania (D). W razie wystąpienia ograniczenia prędkości, na odcinku wcześniejszym następuje hamowanie (e) do zadanej mniejszej prędkości (f), a po przebyciu odcinka wolniejszego przyspieszenie do pełnej prędkości (g-h). Czas  $t'$  jest to czas przejazdu odcinka ze stałą prędkością maksymalną ( $V_{max}$ ), za to czas  $t$ , jest to czas potrzebny na przebycie odcinka wraz ze stratami czasu na rozruch i hamowanie, oraz z jazdą ze zmniejszoną prędkością ( $V_{ogr}$ ).

Czas przejazdu odcinka o stałej prędkości, określa się zgodnie ze wzorami:

$$t = \frac{S}{V_{max}} \quad (1)$$

Wydłużenie czasu jazdy z uwagi na rozruch i hamowanie, w przypadku rozruchu i hamowania do zatrzymania:

$$t_R = \frac{V_{max}}{2 \cdot a_r} \quad (2)$$

$$t_H = \frac{V_{max}}{2 \cdot a_h} \quad (3)$$

Dodatkowe straty czasu z uwagi na rozruch i hamowanie, w przypadku zmiany prędkości na szlaku:

$$t_r = \frac{(V_{ogr} - V_{max})^2}{2 \cdot a_r \cdot V_{ogr}} \quad (4)$$

$$t_h = \frac{(V_{max} - V_{ogr})^2}{2 \cdot a_h \cdot V_{max}} \quad (5)$$

gdzie:

- $S$  – długość odcinka,
- $V_{max}$  – prędkość maksymalna na odcinku,
- $V_{ogr}$  – prędkość ograniczona,
- $a_r$  oraz  $a_h$  – przyspieszenie rozruchu i hamowania.

Czas jazdy  $t$ , powstaje poprzez zsumowanie czasu jazdy ze stałą prędkością, oraz czasów wydłużających.

### Przykład obliczeń

Dla zobrazowania i sprawdzenia poprawności przyjętej metody, dokonano obliczeń dla linii tramwajowej nr 11 w Gdańsku.

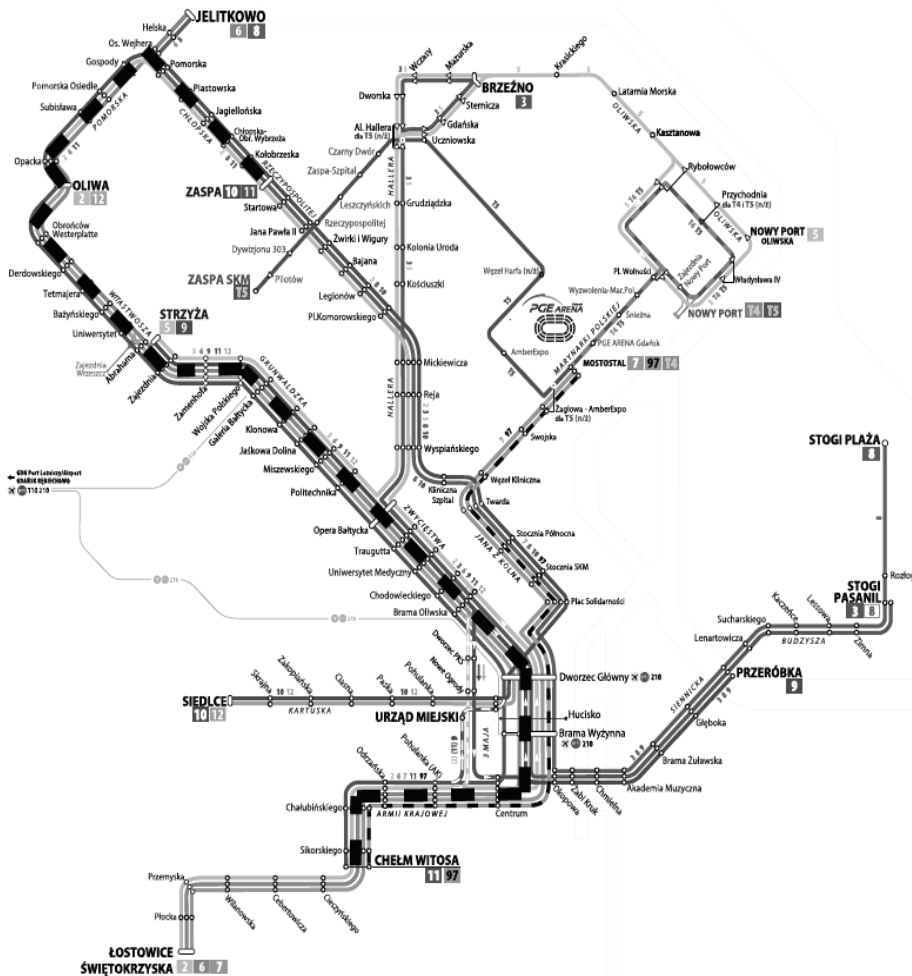
Trasa linii tramwajowej nr 11 (rys. 3) Zaspa – Chełm Witosa ma 16,5 km długości i jest jedną z najdłuższych linii tramwajowych w Gdańsku. Pod tym względem ustępuje jedynie liniom: numer 6 (Jelitkowo – Łostowice Świętokrzyska) - 17,7 km, numer 2 (Oliwa – Łostowice Świętokrzyska) - 17,1 km oraz numer 8 (Jelitkowo – Stogi Plaża) - 16,7 km. Przebiega ona przez największe dzielnice i osiedla mieszkaniowe tzw. Dolnego Tarasu. Rozpoczyna się od pętli tramwajowej Zaspa, a następnie prowadzi przez Przymorze (45 649 mieszkańców), Żabiankę (18 546), Oliwę, VII Dwór oraz Strzyżę (27 307), Wrzeszcz Górny z Aniołkami (29 220),

Śródmieście (30 648), aż do węzła integracyjnego Chełm Witosa położonego na Górnym Tarasie (Chełm – 45 704). Na całej długości linia jest dwutorowa oraz - poza szlakiem Subisława – Opacka (0,6 km, 3,6% trasy) - wydzielona z jezdni. Na odcinku Zaspa – Pomorska oraz Obrońców Westerplatte – Chełm Witosa (14,3 km, 86,8% długości trasy) tory tramwajowe są zlokalizowane w pasie dzielącym jezdnie. Natomiast na odcinku Pomorska – Subisława oraz Opacka – Oliwa (1,3 km, 7,8% długości trasy) znajdują się z boku jezdni. Wyjątek stanowi szlak Oliwa – Obrońców Westerplatte, na którym linia przebiega poza pasem drogowym. Najnowszy fragment trasy stanowi oddany do użytku w grudniu 2007 roku odcinek Centrum – Chełm Witosa, który pomiędzy Węzłem Grodecka a skrzyżowaniem Al. Gen. Sikorskiego/ul. Chałubińskiego/ul. Dragana (2,1 km, 12,7 % długości trasy) jest bezkolizyjny.

Na trasie linii tramwajowej nr 11 zlokalizowanych jest 35 przystanków. W kierunku Zaspa – Chełm Witosa, znajduje się dodatkowy, 36 przystanek – Gospody. W 45 miejscach występują kolizje między ruchem tramwajów i ruchem pozostałych użytkowników drogi. Na długości linii zidentyfikowano 29 skrzyżowań, 4 pasy do zawracania, 3 przejazdy - wjazdy na posesje oraz 9 przejść dla pieszych poza skrzyżowaniami (w tym 3 z sygnalizacją świetlną). Dodatkowe punkty kolizji stanowi 12 węzłów rozjazdowych.

Z powyższych elementów wynika rozkładowy czas jazdy, który w obydwu kierunkach wynosi 54 minuty, co daje prędkość komunikacyjną na poziomie 18,3 km/h. [12]

W przedstawionym przykładzie symulowano przejazd tramwaju N8C MF-01, przedstawiciela najliczniejszej obecnie serii tramwajów w Gdańsku. Są to pojazdy pochodzące z niemieckiej fabryki wagonów Düwag z Düsseldorfu, produkowane w latach 1978-1986. Zakład Komunikacji Miejskiej w Gdańsku zakupił 46 sztuk używanych wagonów z Dortmundu, które zostały sukcesywnie dostarczane i poddawane modernizacji w latach 2007- 2012. Przyjęto następujące założenia: przyspieszenie rozruchu 1,2 m/s<sup>2</sup>, opóźnienie hamowania 1,6 m/s<sup>2</sup>, prędkość maksymalna 60 km/h [2]. Przyjęto, że na odcinkach wydzielonych tramwaj osiąga prędkość maksymalną, a na odcinkach wspólnych z jezdnią porusza się zgodnie z przepisami drogowymi, czyli z prędkością 50 km/h. W ogólności jest to podejście niezgodne z przepisami [3], ale zaobserwowane w czasie rzeczywistych przejazdów, jako typowe zachowanie prowadzących tramwaje. Postoje na przystankach symulowano jako wytracenie prędkości do zatrzymania i postój o długości 10 sekund, co odpowiada rzeczywistości przy odpowiednim dopasowaniu taboru i geometrii przystanku do potoków pasażerskich [7]. Określono maksymalne prędkości przejazdu po układzie geometrycznym, rozpatrując każdy odcinek osobno. Przyjęto, że w modelu wynikowym, tramwaj nie będzie poruszał się szybciej niż pozwalają na to ogólnie narzucone i oznakowane przez zarządcę infrastruktury ograniczenia prędkości [16], a na łukach bez ograniczeń prędkości zastosowano zasadę ograniczenia prędkości do



3. Przebieg linii tramwajowej numer 11, na tle pozostałych linii (Opracowanie własne na podstawie schematu ZTM Gdańsk)

wartości nie wywołującej dyskomfortu u pasażerów. Prędkość przejazdu przez rozjazdy ograniczono (niezależnie od kierunku jazdy) do 15 km/h [17].

Zgodnie z przedstawionym algorytmem, analizę rozpoczęto od teoretycznego przejazdu tramwaju po trasie linii doskonale prostej i bez zatrzymań. Przy założeniu średniej prędkości 60 km/h, przejazd całej trasy zajęłby 0:16:48, czasy w dalszej części analizy podano w formacie [h:m:ss].

Uznano, że właściwym będzie rozpatrywanie przejazdu z zatrzymaniami przynajmniej na krańcówkach. W takim przypadku czas przejazdu trasy linii 11 wyniósłby 0:17:00 i średnia prędkość spadłaby do 59,28 km/h. Samo rozpędzanie się tramwaju wydłużyło czas przejazdu o 7 sekund, a hamowanie o 5 sekund.

Kolejnym krokiem było określenie prędkości normatywnej, czyli maksymalnie możliwej do osiągnięcia w istniejącym układzie geometrycznym i przy obsłudze przystanków. Nie bez powodu, straty czasu w punkcie 2 zostały rozdzielone na straty powstające podczas jazdy (straty na dynamicie), oraz na straty powstające podczas hamowania, postoju i rozpędzania podczas obsługi przystanku. Każda ze strat może zostać zmniejszona inną metodą i nie można rozpatrywać ich wspólnie.

Czas przejazdu tramwaju linii nr 11, po wyeliminowaniu wszystkich ograniczeń prędkości, związanych z geometrią toru, bądź z rozjazdami wyniósłby 0:30:17, co daje średnią prędkość przejazdu 33,28 km/h. Oznacza to, że żadna modernizacja geometrii trasy, bez ograniczenia dostępności tramwaju (usunięcie przystanku),

Tab. 1. Przykład obliczeń dla linii 11

1	2	3	4	5							10	11
				Ograniczenia prędkości w kierunku B								
Nazwa przystanku	Kierunek B	Typ	Opis	Vmax	Długość	V	Tr	Tj	Th			
										[s]	[s]	[s]
Subisława	Opacka	600	[O]	1 2 Hałas i drgania	20	100	5,556	2,3	18,0			
			[K]	łuk pod wiaduktem kolejowym	30	100	8,333	0,4	12,0			
			[B]	tor niewydzielony	50	350	13,889	0,9	25,2	2,1		
Opacka	Oliwa	450	[K]	łuk przed przystankiem	15	50	4,167		12,0	1,3		
			[B]	stan nawierzchni	50	300	13,889	5,8	21,6	2,1		
			[O]	14 Ograniczenie widoczności	15	75	4,167		18,0			
Oliwa	Obrońców Westerplatte	400	[R]	rozjazdy na pięci Oliwa	15	75	4,167		18,0	1,3		
			[K]	łuk wyjazdowy z petli Oliwa	15	50	4,167	1,7	12,0			
			[O]	21 22 Nadmierne drgania	60	175	16,667	3,9	10,5	2,9		
			[O]		15	75	4,167		18,0	1,3		

nie pozwolą na zmniejszenie czasu jazdy poniżej wspomnianych 30 minut.

Za to w istniejącym układzie geometrycznym, bez zatrzymań na przystankach, czas jazdy wyniósłby 0:24:30, co daje średnią prędkość przejazdu 41,15 km/h. Oznacza to, że nie da się zmniejszyć czasu jazdy, nawet likwidując przystanki, poniżej 24,5 minut, jeśli nie zostaną wprowadzone zmiany geometrii toru.

Zestawienie tych dwóch wartości pokazuje, że 0:13:17 trwa obsługa przystanków, razem z rozruchem i hamowaniem, a tylko 0:07:30 przypada na zmniejszenie płynności jazdy z uwagi na łuki i rozjazdy. Prędkość normatywna i powiązany z nią czas jazdy, nie powstają jednak ze zwykłego sumowania wartości podanych wyżej. Z uwagi na występujące przystanki w łuku, przystanki przed węzłami rozjazdowymi i podobnymi nakładającymi się na siebie generatorami strat, uogólnione straty czasu będą mniejsze niż wynikałoby to z prostego dodania wartości.

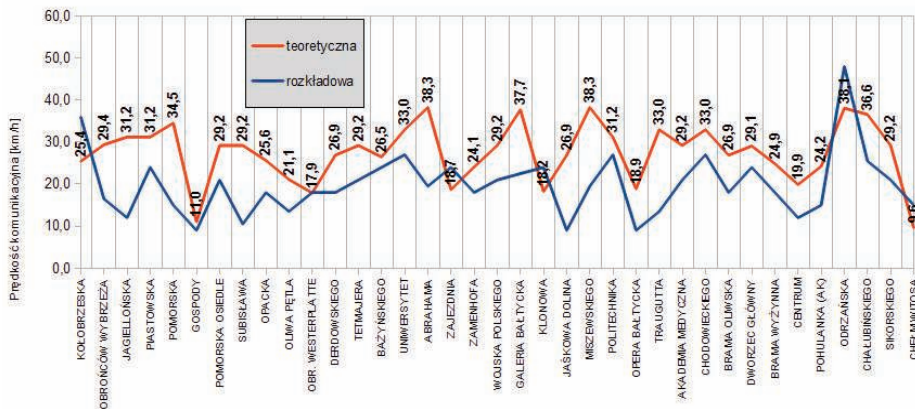
Teoretyczny czas przejazdu po istniejącym układzie geometrycznym i funkcjonalnym wyniósłby 0:35:59, co daje średnią prędkość przejazdu 28,02 km/h. Łączna strata czasu w stosunku do czasu przejazdu odcinka idealnego wynosi 0:18:59 i jest o 0:01:48 mniejsza niż wynikałoby to z sumowania strat cząstkowych. Można założyć, że utrzymując całą trasę w należytym stanie technicznym, nie jest możliwe uzyskanie krótszego czasu jazdy i wyższej prędkości komunikacyjnej. Wysoka, możliwa do osiągnięcia prędkość komunikacyjna oznacza, że linia tramwajowa nr 11, ma duży potencjał wyrażony w możliwym skróceniu czasu podróży.

Trzecim punktem algorytmu jest określenie maksymalnej prędkości możliwej do osiągnięcia przy aktualnym stanie infrastruktury. W tym celu wykorzystano pełną tabelę ograniczeń prędkości, z uwagi na nakładanie się czynników powodujących straty czasu, nie powtórzono czynności z poprzedniego punktu, gdyż można wysnuć analogiczne wnioski iż suma strat czasu czynników rozpatrywanych oddzielnie będzie większa niż strata przy ich połączeniu. Obliczenia pokazano w tabeli 1, na przykładzie odcinka między przystankami Subisława a Obrońców Westerplatte. Za punkty charakterystyczne dzielące odcinek uznano miejsce zatrzymania tramwaju, stosując przybliżenie do najbliższej wielokrotności 50 m. Rozważono przejazd w dwóch kierunkach, gdyż przystanki często nie są rozmieszczone osiowo względem siebie (przykładowo po dwóch stronach skrzyżowania). Dla ułatwienia i rozjaśnienia, dalsze wyniki podano dla kierunku B (Zaspa – Chełm Witos). Czwarta kolumna zawiera symbol typu ograniczenia prędkości.

[O] – ograniczenie stałe, oznakowane znakami BT-1 „ograniczenie prędkości” i BT-2 „koniec ograniczenia prędkości” [4];

[K] – ograniczenie prędkości nie oznaczone znakiem, wynikające z konieczności zachowania odpowiedniego komfortu jazdy pasażerów;

[B] – ograniczenie prędkości nie oznaczone znakiem, wynikające z konieczności zachowania



4. Wykres teoretycznych prędkości komunikacyjnych na poszczególnych szlakach, na tle prędkości rozkładowej

wania bezpieczeństwa jazdy;  
[R] – ograniczenie prędkości wynikające z przejazdu przez rozjazd.

Brak symbolu oznacza możliwość jazdy z prędkością maksymalną tramwaju.

Piąta kolumna zawiera opis przyczyny wprowadzenia ograniczenia prędkości, liczby przed opisem występujące w przypadku ograniczeń typu [O], oznaczają numer wiersza w tabeli wykazu ograniczeń [16].

Kolumny 8-11 służą do obliczeń,  $V$  – prędkość przeliczona na m/s,  $T_r$  – wydłużony czas przejazdu odcinka z uwagi na rozpędzanie,  $T_s$  – czas przejazdu odcinka ze stałą prędkością,  $T_h$  – wydłużony czas przejazdu odcinka z uwagi na hamowanie.

Dla tak skonstruowanego modelu linii tramwajowej nr 11 w Gdańsku obliczono czas przejazdu całej trasy wraz z obsługą przystanków: 0:37:33, co daje średnią prędkość 26,85 km/h (rys. 4). Oznacza to, że z uwagi na stan toru i inne możliwe do poprawy elementy trasy, tramwaje pokonują trasę w czasie o 1 minutę i 34 sekundy dłuższym (4,2 %), niż w przypadku trasy utrzymanej w stanie idealnym. Okazało się, że w przypadku kilku szlaków, rozkładowa prędkość jest większa niż teoretycznie możliwa do osiągnięcia. Oznacza to, że upublicznione rozkłady jazdy (z dokładnością 1-minutową) nie są wystarczające dla wykorzystania do tego typu analiz.

Ostatnim punktem algorytmu było określenie strat czasu, powstających podczas jazdy i wynikających z innych czynników. Jak wspomniano wcześniej, rozkładowy czas przejazdu trasy wynosi 54 minutę, czyli jest o 16 minut i 27 sekund dłuższy (43,8 %) niż teoretycznie możliwy do osiągnięcia. Określenie przyczyn tak dużych strat czasu wymaga zastosowania specjalnych metod badawczych. Badania można podzielić na:

- pomiar tradycyjny z dokładnością 1 minuty (lub o zwiększonej dokładności do 1 sekundy) w którym rejestrowany jest moment odjazdu z przystanku;
- pomiar rozszerzony, w którym z dokładnością do 1 sekundy określone są czasy otwarcia i zamknięcia drzwi;
- pomiar pełny, który z dokładnością 1 sekundy określa fazy obsługi przystanku (oczekiwanie na wjazd na przystanek, otwarcie drzwi, koniec wymiany pasażer-

ów, odjazd z przystanku) [1].

Pierwsze dwa rodzaje pomiaru mogą być rejestrowane zdalnie, za to pomiar pełny musi być uzupełniony przez obserwatora. Wydaje się, że tak przedstawiona definicja pomiaru pełnego nie jest wystarczająca do wyczerpującej odpowiedzi na pytanie o przyczyny strat czasu, a obecność obserwatora pozwala na odczyt jeszcze większej liczby danych o samym przejeździe, na przykład o stracie czasu powstającej podczas oczekiwania przed skrzyżowaniami występującymi między przystankami.

Rozszerzona analiza strat czasu, które zostały pomierzone w czasie badań, nie jest celem tego artykułu, więc zasygnalizowano jedynie możliwe metody badawcze.

### Weryfikacja obliczeń

W celu weryfikacji modelu obliczeniowego, posłużono się dwoma rodzajami badań. Wykorzystano pomiar tradycyjny o zwiększonej dokładności, wykonywany automatycznie na dużej próbie oraz pomiar pełny – na próbie o mniejszej liczebności – uzupełniony o pełen zakres obserwacji w czasie przejazdu.

Pomiar tradycyjny polegał na określeniu średniego czasu przejazdu poszczególnych szlaków między przystankami i wykonany został na podstawie danych uzyskanych z przejazdów na linii nr 11 w okresie 01.01.2013 – 31.03.2013.

Pomiar pełny został wykonany w okresie 12.01.2013 – 23.02.2013 podczas 25 przejazdów. Pomiar polegał na rejestracji jazdy przy pomocy kamery, uzupełniony o głosowe komentarze prowadzącego (rys. 5).

Pozwoliło to na identyfikację czasu wystąpienia poszczególnych elementów jazdy, postojów i obsługi przystanku oraz wykonanie analizy czasowej zdarzeń. Wyeliminowano wpływ techniki jazdy na rozrzut wyników, wykorzystując do badań tego samego motorniczego. Wyeliminowano również wpływ opóźnień powstających z uwagi na sprzedaż biletów przez prowadzącego pojazd. Straty czasu na postojach określono w sposób bardzo dokładny, gdyż prowadzący był w pełni świadomy celu badania i dostosował technikę jazdy do potrzeb badania. Do weryfikacji modelu wykorzystano następujące wyniki:

- minimalny czas przejazdu odcinka – wybrany dla każdego ze szlaków spośród 25 pomiarów;
- średni czas przejazdu odcinka;
- średni + czas przejazdu odcinka – obliczony jako średni czas przejazdu szlaku, spośród przejazdów normalnych, bez zaburzeń spowodowanych awarią, ręcznym przekładaniem zwrotnicy, oczekiwaniem na przystanku w celu odjazdu zgodnie z rozkładem jazdy czy obsługi dobiegających pasażerów.

Czas przejazdu szlaku liczone od początku obsługi pierwszego przystanku, do rozpoczęcia obsługi na kolejnym przystanku.

Weryfikację rozpoczęto od wyliczenia różnic w czasie przejazdu rzeczywistego i teoretycznie wyznaczonego. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie minimalnego uzyskanego w czasie pomiaru pełnego, z teoretycznie wyznaczonym. Wyraźnie widać dużą zgodność, różnica w czasie oscyluje wokół zera i nie przekracza 10 sekund. Duże ujemne różnice występują na szlakach: Obrońców Wybrzeża – Jagiellońska, Subisława – Opacka, Wojska Polskiego – Galeria Bałtycka. Spowodowane są one postojami przed sygnalizacją świetlną, podczas żadnego z 25 przejazdów nie udało się przejechać tych szlaków bez strat czasu. Krótsze niż teoretycznie wyznaczone czasy jazdy spowodowane są



5. Zainstalowana w tramwaju dodatkowa kamera

krótszą niż zakładano obsługą przystanków oraz niewielkim przekroczeniem dozwolonej prędkości.

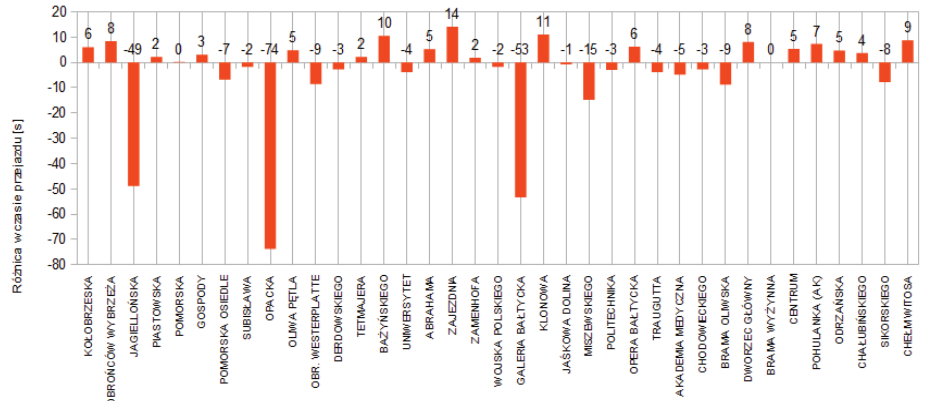
Następnie zajęto się weryfikacją średnich czasów przejazdu szlaków. Czasy przejazdów poszczególnych szlaków, uzyskane podczas badań, na tle teoretycznego czasu przejazdu, przedstawiono na rysunku 7. Wartości znajdujące się powyżej wykresu czerwonego (teoretycznego) mogą być traktowane jako straty czasu. Widać wyraźnie odcinki, na których czasy teoretyczne pokrywają się ze średnimi (lub są lekko przesunięte). Można wnioskować, że są to odcinki na których nie występują znaczące wartości strat czasu. Zauważyć można różnice pomiędzy wykresami czasów średni +, a średnim czasem obliczonym na podstawie pomiaru tradycyjnego. Pomiar tradycyjny wykonywany był za pomocą urządzeń samoczynnych, które nie różnicują warunków normalnych, od stanów awaryjnych (zator, kolizja, awaria tramwaju, celowe spowalnianie jazdy z uwagi na przyspieszenie).

W ogólności widać, że typowo tramwaje poruszają się wolniej i tracą więcej czasu niż pojazd testowy. Wynikać to może z innej motoryki prowadzących „liberalnego” podejścia do rozkładu jazdy, czy sprzedaży przez nich biletów (podczas badań sprzedaż biletów została wyeliminowana z czynników powodujących straty czasu i będzie badana w kolejnych pomiarach). Widać również, że średni czas przejazdu niektórych odcinków, jest krótszy niż minimalny zarejestrowany podczas pomiaru pełnego. Może to sugerować nie stosowanie się do przepisów przez prowadzących, gdyż podczas przejazdów pomiarowych w sposób dosłowny interpretowano wszelkie wytyczne. Wykres średni tradycyjny jest słabiej amplitudowany, niż wykres średni +, co oznacza ułatwienie identyfikacji miejsc będących największymi generatorami strat przy analizie wykresu średni +. Z analizy rysunku 7 można wywnioskować, że im bardziej zautomatyzowany sposób pomiaru, tym mniej wyraźne będą różnice między poszczególnymi szlakami, a im metoda bardziej zaawansowana, tym łatwiej można wyodrębnić odcinki szczególnie narażone na wydłużanie się czasu przejazdu.

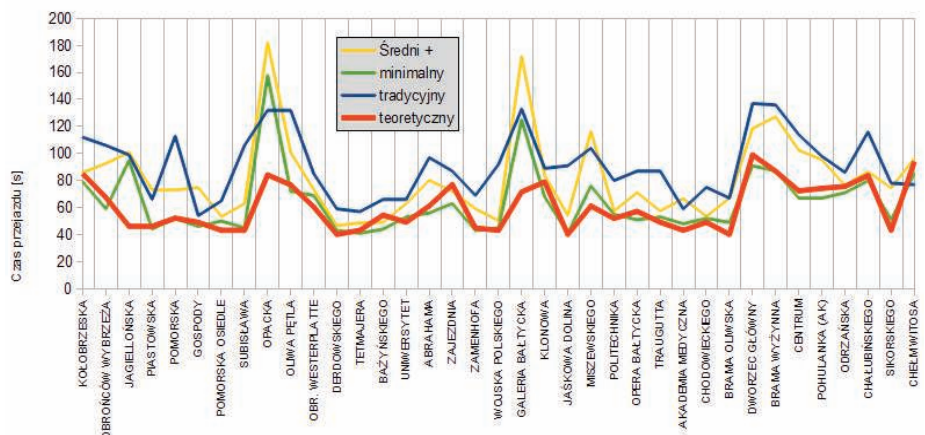
Analizę miejsc generowania strat czasu wykonano na podstawie wykresu różnic między czasami teoretycznymi a średnimi i średnimi + uzyskanymi na podstawie 25 przejazdów testowych. Do określenia miejsc generowania typowych strat czasu na postojach przed sygnalizacjami, jako optymalną przyjęto metodę różnic czasu teoretycznego i średniego + (rys. 8). Natomiast do określenia pozostałych strat czasu (ręczne przekładanie zwrotnicy, zatory), jako różnicę pomiędzy czasem średnim + a średnim (rys. 9). Zwiększone wartości różnic wskazują miejsca będące szczególnie uciążliwymi generatorami strat.

Wykonano podstawową analizę powodów powstawania opóźnień na szlakach. Przyjęte oznaczenia:

- A – straty związane z awarią tramwaju (nie mogą być brane pod uwagę jako typowe, ale z uwagi na znaczącą długość pojedyn-



6. Różnice w czasach przejazdów rzeczywistych i teoretycznych na poszczególnych szlakach



7. Czasy przejazdów poszczególnych szlaków

czego zdarzenia (kilka, kilkadziesiąt minut) powodują powstanie wyraźnego skoku na wykresie;

- P – straty związane z wydłużonym oczekiwaniem na wjazd lub odjazd z przystanku, z uwagi na poprzedzający tramwaj, który obsługuje jeszcze ten przystanek;
- R – straty związane z wydłużonym postojem na przystanku, z uwagi na oczekiwanie na odjazd zgodny z rozkładem jazdy (zbyt długi rozkładowy czas przejazdu);
- Z – straty związane z ręcznym przekładaniem zwrotnicy (niesprawny mechanizm).

W wytypowanych punktach należy przeprowadzić rozszerzoną analizę przyczyn powstawania strat czasu. Można wnioskować, że w normalnej eksploatacji (co wykazał pomiar tradycyjny), prowadzący pojazdy w sposób dowolny podchodzą do przepisów i starają się zmniejszać czasy oczekiwania przed sygnalizacją, między innymi przejeżdżając przy zapalonym sygnale zabraniającym wjazdu za sygnalizator, bądź nie przestrzegając znaków ograniczenia prędkości, czy rozkładu jazdy. Jednak sytuacje patologiczne, nawet występujące powszechnie, nie powinny być uwzględniane podczas opracowywania modeli działania sieci transportowej.

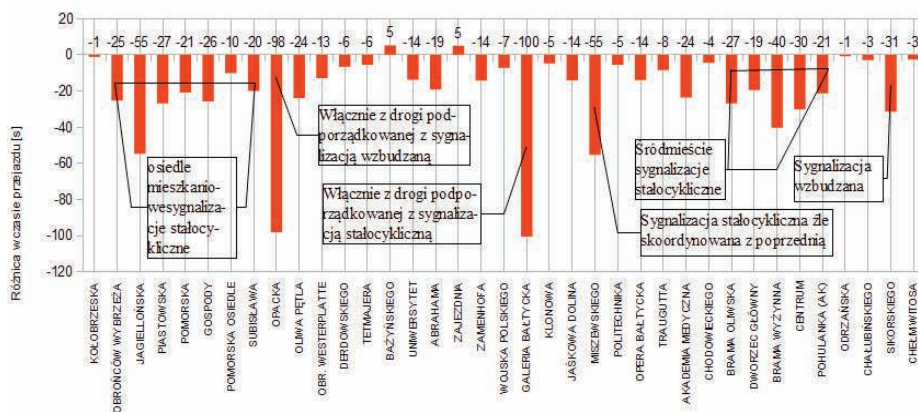
## Wnioski

Zaplanowany i przeprowadzony na szeroką skalę program modernizacji sieci tramwajowych, pozwolił na zminimalizowanie strat czasu po-

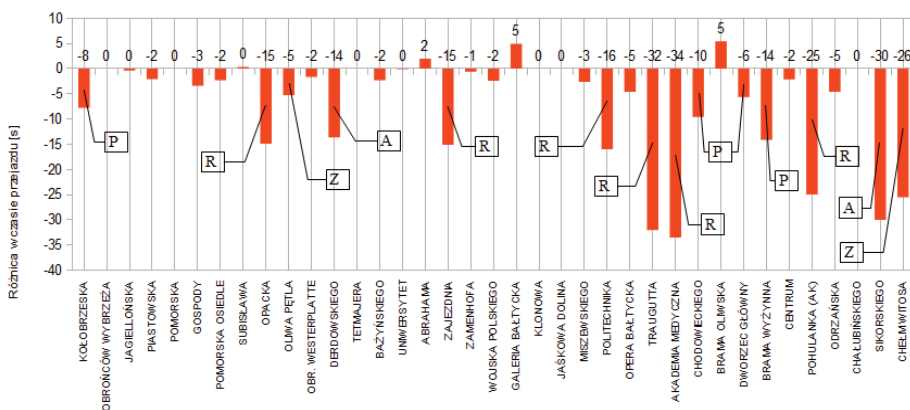
wstających z uwagi na ograniczenia prędkości związane ze złym stanem toru (tylko 4,2% wzrostu czasu jazdy). Jednak nie przełożyło się to na zwiększenie prędkości komunikacyjnej z uwagi na brak jednoczesnego usprawnienia i dostosowania do nowych warunków sygnalizacji. Pomimo znacznego wzrostu prędkości na szlakach między skrzyżowaniami, niezmienione, stałoczasowe programy istniejących systemów sterowania sygnalizacją świetlną oraz nowe sygnalizacje, w tym wzbudzone (bez priorytetu dla tramwaju) spowodowały wzrost strat czasu na zbędnych zatrzymaniach. Czas przejazdu nie skrócił się, a na niektórych odcinkach uległ wręcz wydłużeniu (straty na zatrzymaniach oraz rezerwa z uwagi na dyspersję czasów przejazdu zwiększają długość jazdy o 43,8%).

Odseparowanie torowiska z ruchu kołowego, bez inwestycji w priorytet ruchowy dla tramwajów, nie przynosi zamierzonych efektów w postaci skrócenia czasu jazdy. Program Tristar (inteligentny system sterowania ruchem) może pozwolić na zmniejszenie strat powstających w miejscach zatrzymań przed sygnalizacją świetlną. Badania przedstawione w artykule zostały wykonane przed rozpoczęciem na dużą skalę prac przy tym systemie i mogą posłużyć za bazę do określenia stopnia usprawnienia ruchu tramwajowego po uruchomieniu Tristara.

Badanie strat czasu, oparte wyłącznie na obserwacjach jest narażone na znaczne błędy. Obserwator lub urządzenie rejestrujące nie jest w stanie określić, czy prowadzący pojazd analizując sytuację ruchową, nie stara się jechać



8. Analiza miejsc i przyczyn powstawania strat czasu związanych z sygnalizacją



9. Analiza miejsc i przyczyn powstawania strat czasu związanych z innymi elementami

wolniej, lub łamać przepisy, minimalizując straty powstające przy zatrzymaniu. Aby ocenić w sposób jednoznaczny straty powstające na zatrzymaniu, niezbędna jest pełna współpraca motorniczego.

Dzięki zapewnieniu współpracy z motorniczym, można było dokładnie określić, że najprostsze obliczenia trakcyjne pozwalają określić minimalne czasy przejazdu szlaku (bez przeszkód w postaci sygnalizacji świetlnej i punktów kolizyjnej) z dokładnością do 5%. Nawet w przypadku nachylenego odcinka Centrum – Chałubińskiego, nowoczesne tramwaje niskopodłogowe wykazują wystarczająco dobre właściwości trakcyjne, aby w obie strony pokonywać odcinki o pochyleniu dochodzącym do 5,5 % z prędkością maksymalną i w niewiele różniącym się od siebie czasie. Oznacza to, że dla współczesnych tramwajów, czas przejazdu obliczony metodą przybliżoną, może być wykorzystany do określenia maksymalnej możliwej do osiągnięcia prędkości komunikacyjnej i wzorcowego czasu przejazdu niezbędnego do określenia strat czasów. Rezygnacja z rozbudowanego modelu, opartego na obliczeniach dynamicznych, jest jak najbardziej celowa.

Pomiar pełny uzupełniony, pozawala na wyeliminowanie ze średniej długości czasów przejazdu tych szlaków, na których doszło do zdarzenia nietypowego. Tak obliczony średni czas przejazdu szlaku nazwano czasem średnim + i został on wykorzystany do określenia szlaków na których dochodzi do typowych strat czasu związanych z postojem przed sygnaliza-

cją lub wydłużoną obsługą przystanku. Różnica pomiędzy średnią a średnią + wskazuje szlaki szczególnie narażone na typowo występujące straty z innych przyczyn (ręczne przekładanie zwrotnic, zatory itp.).

W razie braku możliwości wykonania pomiaru pełnego, bazując na obliczeniach trakcyjnych i pomiarze tradycyjnym, można określić straty czasu na poszczególnych szlakach, jednak bez możliwości precyzyjnego określenia przyczyny straty czasu i (w przypadku korelacji kilku zdarzeń) czasu traconego na poszczególnych zdarzeniach.

Przedstawione obliczenia trakcyjne, wraz z pogłębioną analizą pomiaru pełnego, mogą stanowić podstawę do prognozowania czasów przejazdu dla nowych inwestycji. Bardzo często, nawet chwilowe zatrzymanie przed sygnalizacją, powodują powstanie dużej straty (z uwagi na konieczność hamowania i ponownego rozpędzenia do prędkości maksymalnej) która może być określona wyłącznie przez porównanie przejazdu rzeczywistego, do wzorcowego.

## Materiały źródłowe

- [1] Bauer M.: Porównanie technik pomiarów czasu przejazdów transportu zbiorowego, Transport Miejski i Regionalny 7/2013.
- [2] Dane przekazane przez użytkownika tramwaju: ZKM w Gdańsku.
- [3] Dz.U. 1997 nr 98 poz. 602 Ustawa z dnia

20 czerwca 1997 r. - Prawo o ruchu drogowym.

- [4] Dz.U. 2003 nr 220 poz. 2181 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.
- [5] GPKM Gdański Projekt Komunikacji Miejskiej, strona internetowa GIK [dostęp 28.11.2013]: <http://www.gik.gda.pl/>.
- [6] Krych A.: Efektywność ekonomiczna przyspieszenia komunikacji tramwajowej, V Konferencja naukowo – techniczna z cyklu „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”: „Transport a rozwój zrównoważony”, Poznań – Rosnówko 2005.
- [7] Krych A.: Modelowanie i symulacja ruchu tramwajów w projektach ITS, Zeszyty naukowo – techniczne Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Komunikacji Rzeczypospolitej Polskiej o. w Krakowie, Nr 90 (zeszyt 148).
- [8] Krych A.: Straty i koszty strat w komunikacji publicznej, III Konferencja naukowo – techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego” Poznań 2001.
- [9] Nowosielski L.: Organizacja przewozów kolejowych, KOW Warszawa 1999.
- [10] Podolski J.: Tramwaj szybki projektowanie i eksploatacja, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 1983.
- [11] Podolski J.: Transport w miastach, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa 1985
- [12] Rozkład jazdy tramwajów i autobusów dostępny na stronie internetowej [dostęp 28.11.2013]: <http://www.ztm.gda.pl/>.
- [13] Rusiak Z.: System BRT w zintegrowanej sieci komunikacyjnej transportu publicznego na przykładzie Stambułu, IX Konferencja naukowo – techniczna z cyklu „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego”: „Wydajność Systemów Transportowych” Poznań – Rosnówko 2013.
- [14] Staszak J., Wyszomirski O.: Ranking postulatów przewozowych i ich wpływ na preferencje komunikacyjne mieszkańców Gdyni, Transport Miejski i Regionalny 10/2005.
- [15] Uziębło M.: Herold Gdański 6(11)/2011.
- [16] Wykaz ograniczeń prędkości dla kierujących tramwajami w układzie torów tramwajowych w Gdańsku, 2012.
- [17] Załącznik do Zarządzenia Nr 57/2010 Dyrektora ZKM w Gdańsku Sp. z o. o. z dnia 25.11.2010, Instrukcja dla kierujących pojazdami (motorniczych i kierowców) w Zakładzie Komunikacji Miejskiej w Gdańsku Sp. z o. o.