

GONDEK Stanisław

## PRĘDKOŚĆ TRAMWAJU NA SKRZYŻOWANIU Z SYGNALIZACJĄ ŚWIETLNA

### Streszczenie

*Na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną tramwaj jest sterowany przez oddzielne sygnalizatory a program sygnalizacji ma zapewnić takie czasy międzyzielone aby tramwaj mógł bezpiecznie wjechać i zjechać ze skrzyżowania. Do obliczenia czasu międzyzielonego potrzebne są czasy ewakuacji i dojazdu tramwaju obliczane na podstawie prędkości i przyspieszenia tramwaju. W referacie zaprezentowano wyniki pilotażowych badań empirycznych prędkości tramwaju przejeżdżającego skrzyżowanie (od linii zatrzymań do punktów kolizji) na kilku skrzyżowaniach w Krakowie. Pomiar objęły przypadki wjazdu tramwaju na skrzyżowanie z biegu oraz z pozycji zatrzymania. Badania empiryczne uwzględniły wszystkie relacje (na wprost i skrętne) oraz różny tabor tramwajowy. Uzyskane wyniki pozwoliły wstępnie zweryfikować wartości parametrów dla tramwaju przyjmowanych w procesie projektowania sygnalizacji świetlanych.*

### WSTĘP

Sygnalizacja świetlna ma wyeliminować możliwość zderzenia się pojazdów na tarczy skrzyżowania, to znaczy, że pojazdowi wjeżdżającemu na skrzyżowanie na żółtym sygnale należy zapewnić bezpieczne jego opuszczenie. Stąd przy projektowaniu sygnalizacji świetlnej należy zwrócić szczególną uwagę na prawidłowe obliczenie czasów międzyzielonych, które zapewniają bezpieczeństwo wszystkim użytkownikom ruchu przy zmianie faz sygnalizacyjnych [1, 2]. Dotyczy to również tramwajów i aby określić dla nich czasy międzyzielone niezbędna jest znajomość prędkości ewakuacji i dojazdu oraz przyspieszenia, co oznacza, że są one najważniejszymi parametrami przy projektowaniu programów sygnalizacyjnych. Przy projektowaniu skrzyżowań warto dążyć do minimalizacji punktów kolizji, poprzez odpowiednie projektowanie, chociażby torowisk tramwajowych. Należy też projektować linie zatrzymań możliwie blisko tarczy skrzyżowania aby przez skrócenie dróg ewakuacji i dojazdu minimalizować wartości czasów międzyzielonych bowiem zbyt duże wartości czasów międzyzielonych powodują obniżenie przepustowości skrzyżowania oraz złe nawyki kierowców, którzy przejeżdżają linię zatrzymań nie tylko na sygnale żółtym ale również na sygnale czerwonym.

Wzrastający wskaźnik motoryzacji przy braku rozbudowy sieci ulicznej i coraz większej ruchliwości mieszkańców sprawia, że warunki podróżowania po mieście stają się coraz mniej akceptowalne przez kierowców. Jednym z możliwych rozwiązań odciążających sieć uliczną jest rozwój komunikacji zbiorowej i ciągów rowerowych oraz zmiana zachowań komunikacyjnych mieszkańców preferujących podróże samochodami osobowymi w stosunku do podróży pojazdami komunikacji zbiorowej, rowerami lub pieszo. W dużych miastach główny nacisk powinno się położyć na rozbudowę sieci komunikacji zbiorowej, zwłaszcza szynowej, która powinna stanowić szkielet komunikacji miejskiej uzupełnionej przez

komunikację autobusową. W Krakowie realizuje się budowę sieci tramwaju szybkiego, która ma stanowić szkielet układu szynowego wspartego Szybką Koleją Aglomeracyjną (SKA).

W referacie przedstawiono wyniki badań empirycznych prędkości jazdy tramwajów na wybranych skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną zlokalizowanych w Krakowie. Z uwagi na niewielkie natężenia tramwajów wykonanie pomiarów prędkości ewakuacji (wjazd tramwaju na skrzyżowanie przy migającej kresce pionowej) i dojazdu (wjazd tramwaju na początku sygnału zezwalającego na wjazd w postaci kreski pionowej) wymagałoby wielogodzinnych pomiarów dla każdego poligonu bez pewności, że uzyska się wymagane liczebności prób. Dlatego też zdecydowano się na pomiar czasów przejazdu tramwajów w czasie sygnału zezwalającego (pionowa kreska na sygnalizatorze) zarówno tych, które przejeżdżały „z biegu” jak i tych „z zatrzymania”. W przypadku przejazdu tramwaju „z biegu” założono, że kwantyl  $v_{15}$  reprezentuje prędkość ewakuacji a kwantyl  $v_{85}$  reprezentuje prędkość dojazdu. Dla przejazdu tramwaju „z zatrzymania” obliczono przyspieszenie  $a$  oraz prędkość przejazdu  $v_t$  od linii zatrzymań do punktu kolizji przy zerowej prędkości początkowej. Wykonano również analizy wpływu wybranych czynników na wartości prędkości i przyspieszenia. Do takich czynników zaliczono długość drogi (ewakuacji/dojazdu), wartość promienia skrętu, lokalizację przystanków tramwajowych i tabor tramwajowy.

## 1. KOMUNIKACJA TRAMWAJOWA

### 1.1. Tramwaje w Krakowie [4]

Historia komunikacji tramwajowej w Krakowie sięga 1882 r., kiedy została uruchomiona pierwsza linia wąskotorowego tramwaju konnego na trasie Dworzec Kolei – Rynek Główny – Most Podgórski. Po ośmiu latach istniejące trasy tramwajowe zostały zelektryfikowane. Po 1949 r. rozpoczął się nowy okres rozbudowy linii tramwajowych. W 1953 r. został zlikwidowany ruch tramwajowy w Rynku Głównym, a 16 lat później przybyły do Krakowa pierwsze tramwaje przegubowe typu 102N. Od 1975 r. rozpoczęła się dostawa wagonów typu 105Na, które do dzisiaj spotyka się na ulicach Krakowa.

Dzisiejsza sieć tramwajowa w Krakowie ma budowę promienistą. Większość linii tramwajowych prowadzi od centrum do poszczególnych dzielnic. Głównymi punktami tej sieci są: Stare Miasto, Rondo Mogiłskie, czy Plac Centralny. Stan torowisk tramwajowych jest oceniany jako dobry bowiem w ostatnich latach część z nich została poddana modernizacji lub przebudowie. Obecnie w Krakowie można spotkać osiem rodzajów tramwajów od starego modelu Konstal 105Na do nowego Bombardier NGT8 czy Protram 405N-Kr. Na dzień 24 grudnia 2012 r. liczba składów wynosiła 271, w tym 36.9 % to składy niskopodłogowe. Na fot. 1 zostały pokazane tramwaje uwzględnione w pomiarach ruchu:

- *Konstal 105Na* eksploatowane w Krakowie od 1979 r. i stopniowo wycofywane z ruchu na rzecz nowszych pojazdów – długość jednego wagonu wynosi 13.5 m,
- *E1* sprowadzone z Wiednia i po zmodernizowaniu eksploatowane w Krakowie od 2004 r. – długość dwuczłonowego wagonu wynosi 19.711 m a długość doczepianego wagonu C3 wynosi 14.1 m,
- *GT8S* sprowadzone z Dusseldorfu w 2009 r. – długość tramwaju wynosi 26.2 m,
- *Bombardier NGT6* sprowadzone do Krakowa w 2000 r. do obsługi linii tramwaju szybkiego – długość pojazdu wynosi 26 m.

### 1.2. Tramwaje na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną

Sterowanie ruchem tramwajami na sygnalizacji świetlnej odbywa się podobnie jak dla pojazdów, z tym, że stosuje się sygnały barwy białej w następującej postaci [5]:

- sygnał w kształcie kreski poziomej oznaczający zakaz wjazdu za sygnalizator,



**Fot. 1.** Tabor tramwajowy eksploatowany w Krakowie i uwzględniony w pomiarach ruchu  
 Źródło: [4]

- sygnał w kształcie kreski pionowej oznaczający zezwolenie na wjazd za sygnalizator, z zastrzeżeniem, że jeśli brak możliwości opuszczenia skrzyżowania w trakcie nadawania sygnału zezwalającego na wjazd lub wjechanie na skrzyżowanie spowodowałoby zagrożenie bezpieczeństwa innych uczestników ruchu, nie wolno wjechać za sygnalizator,
- sygnał migający w kształcie kreski pionowej lub sygnał w postaci dwóch kropek ułożonych poziomo oznaczający zakaz wjazdu za sygnalizator; zakaz nie dotyczy kierujących tramwajami, które w chwili rozpoczęcia nadawania tego sygnału były tak blisko, że nie mogłyby być zatrzymane przed sygnalizatorem bez gwałtownego hamowania; sygnał ten oznacza jednocześnie, że za chwilę nadawany będzie sygnał w kształcie kreski poziomej.

Sygnał biały migający w postaci kreski pionowej jest nadawany przez 3 s i jest odpowiednikiem sygnału żółtego dla pojazdów. Jest on uwzględniany w obliczaniu czasów międzyzielonych jako  $t_z = 3$  s. Czas ewakuacji  $t_e(i, j)$  oblicza się z zależności [5]:

$$t_e(i, j) = \frac{s_e(i, j) + l_p}{v_e(i)} \quad [\text{s}] \quad (1)$$

gdzie:  $s_e(i, j)$  – długość drogi ewakuacji strumienia  $i$  od linii zatrzymania do punktu kolizji ze strumieniem  $j$  [m],

- $l_p$  – wartość wydłużająca drogę ewakuacji w zależności od rodzaju strumienia:
- 10 m dla strumienia pojazdów,
  - 14 m dla strumienia autobusów,
  - $n \times 13.5$  m dla **strumienia tramwajów**, gdzie  $n$  jest liczbą wagonów w składzie,
  - 0 m dla strumienia pieszych i rowerzystów,
- $v_e(i)$  – prędkość ewakuacji [m/s], którą należy przyjąć:

- dla strumienia pojazdów równą prędkości dopuszczalnej na wlocie, jednak nie większą niż 14 m/s,
- dla strumienia autobusów i **strumienia tramwajów** równą **10 m/s**,
- dla pieszych – 1.4 m/s (1.0 m/s w przypadku przejść dla niepełnosprawnych),
- dla rowerzystów – 2.8 m/s.

Czas dojazdu  $t_d(i, j)$  oblicza się ze wzorów:

$$t_d(i, j) = \frac{s_d(i, j)}{v_d(i)} + 1 \quad [\text{s}] \quad (2)$$

lub

$$t_d(i, j) = \sqrt{\frac{2 \cdot [s_d(i, j) + 1.5]}{a}} \quad [\text{s}] \quad (3)$$

gdzie:  $s_d(i, j)$  – długość drogi dojazdu strumienia  $j$  od linii warunkowego zatrzymania do punktu kolizji ze strumieniem  $i$  w [m],

$v_d(i)$  – prędkość dojazdu strumienia  $j$ , którą należy przyjąć, jako równą maksymalnej dopuszczalnej prędkości tego strumienia, uwzględniając jednak uwarunkowania miejscowe, np. dojazd po łuku, pod górę, różne rodzaje strumieni ruchu, itp. w [m/s],

$a$  – zakładane maksymalne przyspieszenie pojazdów strumienia dojeżdżającego:

- 3.5 m/s<sup>2</sup> dla strumienia pojazdów,
- 2.0 m/s<sup>2</sup> dla strumienia autobusów,
- **1.2 m/s<sup>2</sup>** dla **strumienia tramwajów**.

Z powyższych wzorów wynika, że według przepisów prędkość ewakuacji tramwajów należy zawsze przyjmować równą 36 km/h (10 m/s) a długość tramwaju równą 27 m dla składu 2 wagonowego lub 40.5 m dla składu 3 wagonowego. W przypadku prędkości dojazdu (wzór 2) przepisy są bardziej elastyczne i pozwalają uwzględnić uwarunkowania miejscowe. Natomiast w przypadku obliczania czasu dojazdu ze startu zatrzymanego (wzór 3) przepisy zalecają przyjmować maksymalne przyspieszenie równe 1.2 m/s<sup>2</sup>.

## 2. BADANIA EMPIRYCZNE CZASÓW PRZEJAZDU TRAMWAJÓW

### 2.1. Kryteria dla poligonów badawczych

Prowadzone pomiary miały charakter pilotażowy ale starano się uwzględnić możliwie dużo parametrów o zróżnicowanych wartościach i mających wpływ na przejazd tramwaju przez skrzyżowanie. Stąd przy poszukiwaniu poligonów do badań, tzn. skrzyżowań z sygnalizacją świetlną z obsługą linii tramwajowych, kierowano się następującymi kryteriami:

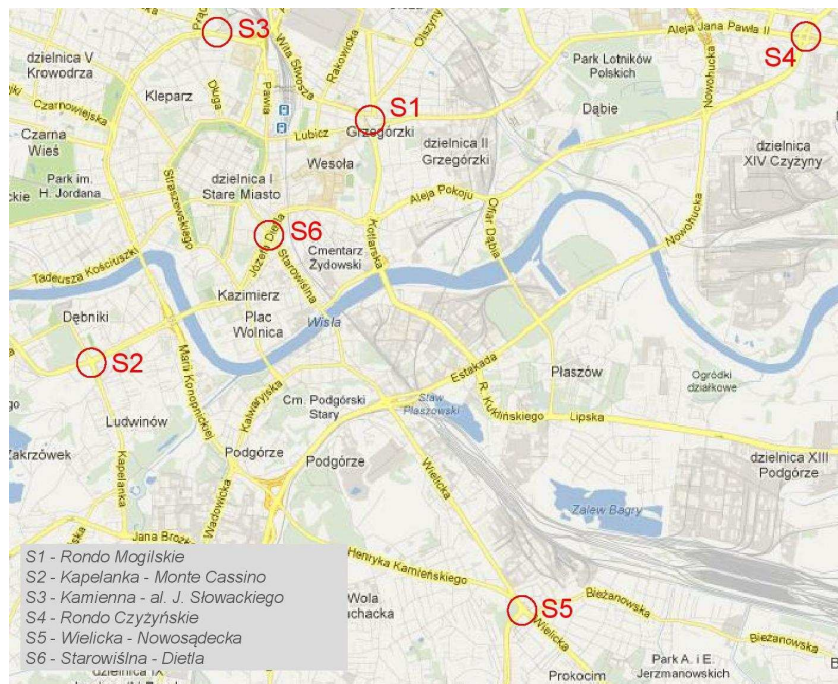
- wielkością skrzyżowania – dla zróżnicowania długości drogi ewakuacji/dojazdu tramwaju,
- lokalizacją przystanków tramwajowych – za lub przed skrzyżowaniem,
- wartością promienia skrętu (w przypadku relacji skrzyżowanych),
- natężeniem ruchu tramwajowego,
- stosowaniem ograniczenia prędkości dla tramwaju na wlotach,
- rodzajem torowiska – prowadzone wraz z ruchem samochodowym lub oddzielnie,
- rodzajem taboru tramwajowego,
- separacją ruchu na różnych poziomach (pojazdy lub piesi),
- stosowaniem systemu sterowania i obsługi priorytetowej dla ruchu tramwajowego.

Ostatecznie do pomiarów wytypowano 6 poligonów zlokalizowanych w różnych częściach Krakowa.

## 2.2. Charakterystyka poligonów badawczych

Do badań wybrano następujące skrzyżowania, jako poligony badawcze (rys. 1):

- poligon badawczy S1 – skrzyżowanie ulic Lubicz – Mogilska – Lubomirskiego – Powstania Warszawskiego (**Rondo Mogilskie**),
- poligon badawczy S2 – skrzyżowanie ulic Kapelanka – Monte Cassino – Zielińskiego – Nowaczyńskiego,
- poligon badawczy S3 – skrzyżowanie ulic Słowackiego – Kamienna,
- poligon badawczy S4 – Jana Pawła II – Bieńczycka – Aleja Pokoju (**Rondo Czyżyńskie**),
- poligon badawczy S5 – skrzyżowanie ulic Kamińskiego – Wielicka – Nowosądecka,
- poligon badawczy S6 – skrzyżowanie ulic Starowiślna – Dietla.



**Rys. 1.** Lokalizacja poligonów badawczych w Krakowie wybranych do wykonania pomiarów empirycznych czasów przejazdu tramwajów przez skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną

Źródło: [3]

Łącznie wykonano pomiary dla osiemnastu relacji, w tym sześć relacji na wprost, sześć relacji skrętnych w lewo oraz sześć relacji skrętnych w prawo a charakterystykę poligonów badawczych przedstawiono w tabl. 1.

## 2.3. Technika pomiarów prędkości i przyspieszenia tramwaju

Badanie polegało na pomiarze czasu przejazdu tramwaju od linii zatrzymania do jednego lub dwóch/trzech punktów kolizji w zależności od wielkości skrzyżowania. W tabl. 1 podano drogę ewakuacji do najdalszego punktu kolizji, najczęściej zlokalizowanego na przejściu dla pieszych na wylocie. Lokalizację pozostałych punktów kolizji przyjmowano na podstawie obserwacji trajektorii ruchu samochodów oraz nanoszono je na udostępnione przez zarządcę plany sytuacyjne skrzyżowań.

Czas przejazdu tramwaju był mierzony pomiędzy linią zatrzymań a pierwszym punktem kolizji oraz dla każdego odcinka pomiędzy przyjętymi kolejnymi punktami kolizji. Momentem rejestracji był przejazd przodu tramwaju przez linię zatrzymań lub punkt kolizji. Czas przejazdu mierzono stoperem na poligonie badawczym lub rejestrowano przejazdy tramwajów kamerą cyfrową a następnie w warunkach kameralnych odtwarzano nagrania na ekranie monitora i mierzono czasy przejazdu kolejnych odcinków.

**Tab. 1.** Poligony badawcze w Krakowie, na których zrealizowano badania empiryczne czasów przejazdu tramwajów przez skrzyżowanie z sygnalizacją świetlną wraz z ich charakterystyką

poli-gon	skrzyżowanie	wlot	rela-cja	droga ewakuacji $l$ [m]	promień skre-tu $R$ [m]	$v_{dop}$ [km/h]	lokaliza-cja przy-stanku
S1	Lubicz – Mogilska – Lubomirskiego – Powstania Warszawskiego ( <i>Rondo Mogilskie</i> )	Lubomirskiego	W	81.0	–	–	wylot
		Lubicz	W	80.1	–	–	wylot
S2	Kapelanka – Monte Cassino – Zielińskiego – Nowaczyńskiego	Kapelanka	P	55.1	49.5	30	wlot
		Monte Cassino	L	53.7	50.3	30	wylot
S3	Słowackiego– Kamienna	Kamienna	P	51.9	27.4	–	wylot
S4	Jana Pawła II – Bieńczycka – Aleja Pokoju ( <i>Rondo Czyżyńskie</i> )	Bieńczycka	P	83.9	47.0	–	wlot
		Jana Pawła II (zach.)	L	92.7	45.5	–	wlot
S5	Kamieńskiego – Wielicka – Nowosądecka	Wielicka	P	70.5	24.0	–	wylot
		Nowosądecka	L	40.7	25.3	–	wlot
S6	Starowiślna – Dietla	Starowiślna (płn.-zach.)	W	87.8	–	10	wlot
			L	29.6	32.4	10	wylot
			P	55.2	47.4	10	wlot
		Dietla (płn.-wsch.)	W	46.5	–	10	wlot
			L	72.8	49.9	10	wlot
		Starowiślna (płd.-wsch.)	W	66.8	–	10	wylot
			P	39.1	52.5	10	wylot
		Dietla (płd.-zach.)	W	37.5	–	10	wylot
L	67.3		50.2	10	wylot		

Zródło: [3]

Czasy przejazdu wpisywano do formularza rejestrując jednocześnie relację (na wprost, skręt w lewo czy skręt w prawo), sposób jazdy (czy wjazd na skrzyżowanie był „z biegu” czy „z zatrzymania”) oraz rodzaj tramwaju (Konstal 105Na, Bombardier NGT6, E1 oraz GT8S). Pomiar na poligonie wykonywany był do czasu uzyskania wymaganej liczebności próby dla tramwajów wjeżdżających z zatrzymania.

Prędkość tramwaju obliczano z wzoru:  $v = l/\Delta t$ , gdzie:  $\Delta t$  był pomierzonym czasem przejazdu odcinka a  $l$  długością tego odcinka odczytaną z podkładu mapowego. Dla przejazdów z zatrzymania obliczano przyspieszenie tramwaju ze wzoru:  $a = 2 \cdot l/\Delta t^2$ .

## 2.4. Analizy statystyczne wyników badań

W trakcie pomiarów zarejestrowano czasy przejazdu 555 tramwajów (w tym tylko 18 dla przejazdu „z biegu”), które zostały stabelaryzowane dla poszczególnych wlotów i relacji. Dla wszystkich pomiarów sprawdzano wymagane liczebności prób oraz prowadzono analizy statystyczne obejmujące: miary położenia (średnia arytmetyczna, przedział ufności dla średniej, mediana, kwantyle 15 % i 85 %), miary zmienności (wariancja, odchylenie standardowe, współczynnik zmienności), miarę asymetrii i miarę koncentracji. Rozkład badanych parametrów przedstawiano w postaci histogramów i dystrybuant.

Analizy statystyczne prowadzono również dla zagregowanych wyników z wszystkich poligonów dla poszczególnych relacji.

## 3. WYNIKI BADAŃ EMPIRYCZNYCH

Badania empiryczne zostały wykonane na skrzyżowaniach w Krakowie w okresie sierpień ÷ listopad 2012 . Ze względu na zmienne warunki ruchu pomiary przeprowadzono obejmując zarówno godziny szczytów (porannego i popołudniowego) jak i godziny pozaszczytowe we wszystkie dni tygodnia.

Analizy wyników badań objęły dane pomiarowe dla każdego poligonu z rozbiciem na poszczególne odcinki oraz z uwzględnieniem relacji i rodzaju taboru [3]. Poniżej

zaprezentowano wyniki dla zagregowanych danych pomiarowych z poszczególnych poligonów.

### 3.1. Analizy dla tramwaju wjeżdżającego „z biegu” na skrzyżowanie

Prędkość tramwaju wjeżdżającego na skrzyżowanie „z biegu” może być pomocne do oszacowania prędkości  $v_e$  i  $v_d$  dla tramwaju potrzebne przy obliczaniu czasów ewakuacji (wzór 2) i dojazdu (wzór 3) Prędkości ewakuacji/dojazdu powinny być mierzone przy wjeździe tramwaju na skrzyżowanie w trakcie nadawania sygnału w postaci kreski pionowej – na początku sygnału dla prędkości dojazdu i na końcu sygnału (lub w trakcie nadawania sygnału migającej kreski pionowej) dla prędkości ewakuacji. Jak wykazały pomiary empiryczne przejazdy „z biegu” występują bardzo rzadko i dlatego do oszacowania poszukiwanych prędkości wykorzystano wszystkie przejazdy „z biegu”. Przyjęto, że prędkość ewakuacji odpowiada kwantylowi 15 % a prędkość dojazdu kwantylowi 85 % prędkości przejazdu skrzyżowania „z biegu”. Statystyki prędkości tramwaju przejeżdżających skrzyżowanie „z biegu” z uwzględnieniem relacji przedstawiono w tabl. 2.

**Tab. 2.** Statystyki prędkości tramwaju przejeżdżającego skrzyżowanie „z biegu” dla zagregowanych wyników pomiarów na skrzyżowaniach w Krakowie z uwzględnieniem relacji

Statystyka		relacja	
		na wprost	skrzyżowania w lewo
liczebność	$n$ [-]	11	7
wartość minimalna	$v_{min}$ [km/h]	20.9	28.1
wartość maksymalna	$v_{max}$ [km/h]	26.4	33.4
wartość średnia	$v_{\bar{r}}$ [km/h]	22.8	30.6
odchylenie standardowe	$\sigma_v$ [km/h]	2.00	1.96
<b>kwantyl 15 %</b>	$v_{15}$ [km/h] ([m/s])	<b>21.1 (5.9)</b>	<b>28.2 (7.8)</b>
<b>kwantyl 85 %</b>	$v_{85}$ [km/h] ([m/s])	<b>25.3 (7.0)</b>	<b>32.3 (9.0)</b>

Źródło: [opracowanie własne]

Liczebności prób są niewielkie i nie spełniają wymogu minimalnych liczebności prób. Dlatego do uzyskanych wyników należy podchodzić z ostrożnością. Zaskakujące są znacznie wyższe wartości prędkości dla relacji skrzyżowania w lewo od relacji na wprost. Wynika to ze specyfiki poligonu S2, na którym torowisko jest w bardzo dobrym stanie technicznym (pomiary wykonywano niedługo po generalnym remoncie torowiska) i brak jest zwrotnic i przecięć z innymi torowiskami co pozwala rozwijać znaczne prędkości na analizowanym odcinku pomiarowym. Należy zaznaczyć, że nie zarejestrowano prędkości większej od 10 m/s zalecanej przez przepisy jako prędkość ewakuacji dla tramwajów. Uzyskane wyniki wskazują, że prędkość ewakuacji powinna być niższa rzędu  $6 \div 8$  m/s. Prędkość dojazdu jest niewiele wyższa rzędu  $7 \div 9$  m/s.

### 3.2. Analizy dla tramwaju wjeżdżającego „z zatrzymania” na skrzyżowanie

W przypadku ruszania tramwaju „z zatrzymania” (przystanek na wlocie lub zatrzymanie na sygnale czerwonym) czas dojazdu przy obliczaniu czasów międzyzielonych oblicza się ze wzoru (3) przyjmując maksymalne przyspieszenie równe  $1.2 \text{ m/s}^2$ . W pomiarach empirycznych zarejestrowano 537 tramwajów wjeżdżających na skrzyżowanie z pozycji zatrzymania. Pozwoliło to na obliczenie przyspieszenia ( $a = 2 \cdot l/t^2$ ) przy założeniu, że na linii zatrzymania tramwaj ma prędkość 0 m/s i porusza się ruchem jednostajnie przyspieszonym do osiągnięcia prędkości dopuszczalnej. Należy zaznaczyć, że do analizy wzięto przyspieszenia zarejestrowane pomiędzy linią zatrzymania a pierwszym przyjętym punktem kolizji aby uniknąć uwzględniania przypadków poruszania się tramwaju ze stałą prędkością czyli zerowym przyspieszeniem. Statystyki

przyspieszenia tramwaju wjeżdżających na skrzyżowanie „z zatrzymania” z uwzględnieniem relacji przedstawiono w tabl. 2.

**Tab. 2.** Statystyki przyspieszenia tramwaju wjeżdżającego na skrzyżowanie „z zatrzymania” dla zagregowanych wyników pomiarów na skrzyżowaniach w Krakowie z uwzględnieniem relacji

Statystyka		relacja		
		na wprost	skrzytu w lewo <sup>*)</sup>	skrzytu w prawo <sup>*)</sup>
Liczebność	$n$ [-]	185	175 (158)	177 (125)
wartość minimalna	$a_{min}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.29	0.58 (0.58)	0.56 (0.56)
wartość maksymalna	$a_{max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	6.48	12.77 (4.29)	10.20 (5.03)
wartość średnia	$a_{sr}$ [m/s <sup>2</sup> ]	1.77	2.17 (1.57)	2.60 (1.74)
odchylenie standardowe	$\sigma_a$ [m/s <sup>2</sup> ]	1.001	2.073 (0.638)	1.757 (0.870)
kwantyl 15 %	$a_{15}$ [m/s <sup>2</sup> ]	0.85	1.00 (0.98)	1.03 (0.93)
<b>kwantyl 85 %</b>	<b><math>a_{85}</math> [m/s<sup>2</sup>]</b>	<b>2.73</b>	<b>2.71 (2.13)</b>	<b>4.21 (2.61)</b>
udział tramwajów z $a > 1.2$ m/s <sup>2</sup>	$u_{a>1.2}$ [%]	64.6	72.1 (69.1)	76.8 (67.1)

<sup>\*)</sup> w nawiasach podano wyniki z wyłączeniem danych pomiarowych z poligonów: S2: Kapelanka – Monte Casino i S3: Słowackiego – Kamienna (poligony z torowiskiem bez zwrotnic)

Źródło: [opracowanie własne]

Uzyskane wyniki wskazują na znacznie większe wartości przyspieszenia tramwaju w stosunku do wartości 1.2 m/s<sup>2</sup> zalecanej przez przepisy. Przyjmując uzyskany z pomiarów kwantyl 85 % przyspieszenia tramwaju za reprezentacyjny do zastosowania przy obliczaniu czasów międzyzielonych rzeczywiste przyspieszenie jest ponad dwukrotnie większe od zalecanej wartości i jest porównywalne dla wszystkich relacji.

Analizą objęto również średnie prędkości przejazdu od linii zatrzymań do najdalej położonego punktu kolizji, co odpowiadałoby sytuacji przejazdu odcinka ewakuacji/dojazdu ze stałą prędkością a statystyki dla tej prędkości z uwzględnieniem relacji przedstawiono w tabl. 3.

**Tab. 3.** Statystyki średniej prędkości tramwaju wjeżdżającego na skrzyżowanie „z zatrzymania” dla zagregowanych wyników pomiarów na skrzyżowaniach w Krakowie z uwzględnieniem relacji

Statystyka		relacja		
		na wprost	skrzytu w lewo <sup>*)</sup>	skrzytu w prawo <sup>*)</sup>
liczebność	$n$ [-]	185	175 (158)	177 (125)
wartość minimalna	$v_{min}$ [km/h]	10.2	9.5 (9.5)	10.5 (10.5)
wartość maksymalna	$v_{max}$ [km/h]	26.8	31.2 (23.2)	45.1 (22.6)
wartość średnia	$v_{sr}$ [km/h]	16.2	17.1 (16.0)	20.5 (16.5)
odchylenie standardowe	$\sigma_{vt}$ [km/h]	3.33	4.43 (3.10)	7.59 (2.65)
kwantyl 15 %	$v_{15}$ [km/h]	12.3	13.1 (12.8)	14.8 (13.4)
kwantyl 85 %	$v_{85}$ [km/h]	19.9	21.3 (19.6)	28.7 (18.9)
udział tramwajów z $v < 36$ km/h	$u_{vt<36}$ [%]	100.0	100.0 (100.0)	92.8 (100.0)

<sup>\*)</sup> w nawiasach podano wyniki z wyłączeniem danych pomiarowych z poligonów: S2: Kapelanka – Monte Casino i S3: Słowackiego – Kamienna (poligony z torowiskiem bez zwrotnic)

Źródło: [opracowanie własne]

Jak było do przewidzenia uzyskane wartości prędkości średniej są niższe od prędkości przejazdu skrzyżowania „z biegu”, ponieważ tramwaj musi przyspieszyć z prędkości zerowej do prędkości docelowej.

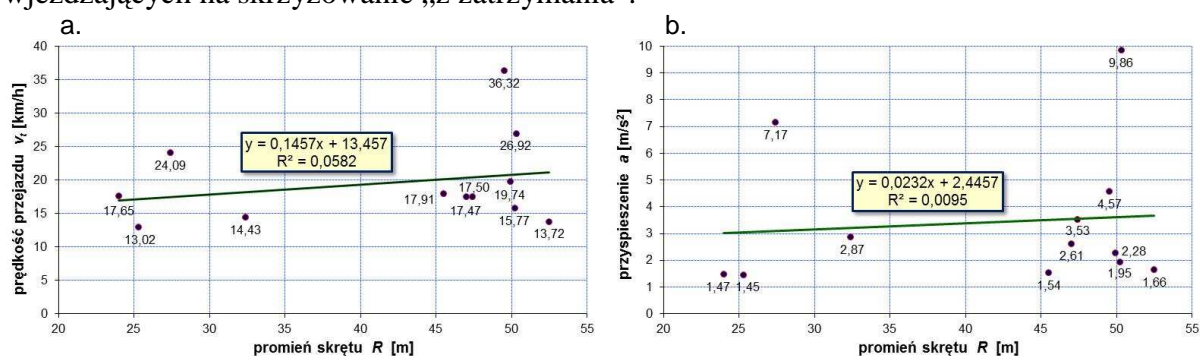
Wykonane analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:



- znaczący wpływ na prędkość i przyspieszenie tramwajów ma obecność zwrotnic i przecięć z innymi torowiskami na odcinku pomiarowym – wyniki w tabl. 2 i 3 pokazują na znaczące zwiększenie wartości statystyk zagregowanych wyników w stosunku do wyników z pominięciem poligonów S2 i S3, na których jest torowisko tylko dla jednego kierunku (bez zwrotnic),
- wartości statystyk (bez poligonów S2 i S3) dla poszczególnych relacji są zbliżone do siebie przy maksymalnych wartościach dla relacji skrzyżowania w prawo co różni się od tendencji dla samochodów osobowych, dla których relacje skrzyżowania poruszają się wolniej od relacji na wprost i są zależne od promienia skrzyżowania [2].

### 3.3. Badanie wpływu wybranych czynników na prędkość i przyspieszenie

Wybór różnorodnych poligonów pozwolił na zbadanie wpływu wybranych czynników na wartości prędkości i przyspieszenia tramwajów. Analizowano wpływ takich parametrów jak długość drogi ewakuacji/dojazdu, promień skrzyżowania, lokalizacja przystanków (na wlocie lub wylocie) i rodzaj tramwaju. Wyniki tych badań można znaleźć w [3] a na rys. 2 pokazano wpływ promienia skrzyżowania  $R$  na prędkość jazdy  $v_t$  i przyspieszenia  $a$  dla tramwajów wjeżdżających na skrzyżowanie „z zatrzymania”.



**Rys. 2.** Zależność prędkości przejazdu tramwaju  $v_t$  (a.) i przyspieszenia  $a$  (b.) od promienia skrzyżowania dla relacji skrzyżowania dla przypadku wjeżdżania na skrzyżowanie „z zatrzymania”

Źródło: [opracowanie własne]

Uzyskane współczynniki determinacji dla przedstawionych zależności wskazują na niewielki wpływ promienia skrzyżowania na badane parametry.

## PODSUMOWANIE

Przeprowadzone pomiary prędkości i przyspieszenia tramwajów na skrzyżowaniach z sygnalizacją świetlną należy traktować jako wyrwykowe i pilotażowe ale wyniki zaprezentowane w referacie oraz wykonane dodatkowe szczegółowe analizy pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- pomimo wielogodzinnych pomiarów i wyboru poligonów objętych systemem sterowania ruchem udało się zarejestrować jedynie 18 przejazdów „z biegu” co stanowi 3.2 % całej próby i dlatego wyniki dla nich należy traktować z ostrożnością,
- prędkości ewakuacji (6 ÷ 8 m/s) i dojazdu (7 ÷ 9 m/s) tramwaju z pomiarów są mniejsze od wartości zalecanej przez przepisy (10 m/s) co może spowodować niedoszacowanie czasu międzyzielonego i zwiększenie niebezpieczeństwa kolizji na tarczy skrzyżowania,
- przyspieszenia tramwaju dla przejazdu z zatrzymania są ponad dwukrotnie wyższe od wartości zalecanej przez przepisy (1.2 m/s<sup>2</sup>) co zapewne wynika z bardziej dynamicznego nowoczesnego taboru tramwajowego i również może spowodować niedoszacowanie czasu międzyzielonego,
- na przejazd tramwaju na skrzyżowaniu znaczący wpływ ma obecność w torowisku zwrotnic i krzyżowania się z innymi torowiskami – w przypadku ich braku wartości prędkości

- i przyspieszenia są znacząco wyższe, co potwierdzają wyniki dla poligonów S2: Kapelanka – Monte Casino i S3: Słowackiego – Kamienna,
- wykonane analizy pokazały, że uzyskane wyniki dla tramwaju są zbliżone dla wszystkich relacji (na wprost i skrętne), co wyraźnie odbiega od wyników uzyskanych dla samochodów osobowych [2],
  - dla relacji skrętnych uzyskano niewielki wzrost wartości prędkości i przyspieszenia ze wzrostem promienia skrętu a niewielkie wartości współczynników determinacji świadczą o jego niewielkim wpływie – dla samochodów osobowych ten wpływ jest znaczący [2],
  - przeprowadzone dodatkowe analizy potwierdziły spodziewany wpływ długości ewakuacji/dojazdu, lokalizacji przystanku (wlot lub wylot) i taboru tramwajowego na parametry przejazdu tramwaju przez skrzyżowanie,
  - przyjmowanie długości tramwaju w wzorze (1) jako wielokrotności 13.5 m może być niepoprawna przy taborze różniącym się m.in. długością – powinno się przyjmować najdłuższy pociąg tramwajowy korzystający z analizowanej relacji,
  - uzyskane rozbieżności pomiędzy wartościami rzeczywistymi prędkości ewakuacji/dojazdu i przyspieszenia a zalecanymi przepisami [5] wskazują na potrzebę dalszych badań na większej liczbie poligonów w różnych miastach Polski dla zweryfikowania tych parametrów i wprowadzenia ich do praktyki projektowej.

## BIBLIOGRAFIA

1. Gondek S.: *Problem czasów międzyzielonych na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną*. Logistyka Nr 4/2007, s. 85 ÷ 88.
2. Gondek S.: *Prędkość ewakuacji na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną*. Logistyka Nr 2/2010, w wersji elektronicznej na dysku CD, s. 633 ÷ 643.
3. Gosztyła E.: *Badanie prędkości jazdy tramwajów na skrzyżowaniu z sygnalizacją świetlną*. Politechnika Krakowska, Kraków 2013 (praca dyplomowa).
4. <http://www.komunikacja.krakow.pl/tramwaje/>
5. *Szczegółowe warunki techniczne dla sygnałów drogowych i warunki ich umieszczania na drogach*. Załącznik nr 3 do Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 3.07.2003 r. Dz. U. nr 220, poz. 2181 z dnia 23.12.2003 r.

## TRAM SPEED ON SIGNALIZED INTERSECTION

### *Abstract*

*At the signalized intersection tram is controlled by a separate signaling and signaling program is to provide such times to tram could safely enter and exit the intersection. To calculate the intergreen time needed evacuation and travel times calculated from the tram speed and acceleration of the tram. The paper presents the results of a pilot study, empirical speed tram passing the intersection (from line stops to collision points) at several intersections in Krakow. Measurements included cases entering the tram at the intersection of race and the stop position. Empirical studies take into account all the relationships (straight and turns) and various trams. The results obtained allowed the pre-verify parameter values for the tram adopted in the design of traffic lights.*

### **Autor:**

dr inż. **Stanisław Gondek** – Politechnika Krakowska, Katedra Budowy Dróg i Inżynierii Ruchu, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. +48 12 628-25-39, e-mail: sgondek@pk.edu.pl