

**Politechnika Warszawska**

**Wydział Elektroniki i Technik Informacyjnych**



# **Niska średnia prędkość tramwajów w Warszawie**

Kornelia Błaszczuk, Piotr Szkoda, Clara Chami,  
Paweł Spirydowicz, Anton Basan

Opiekun

Dr inż. Marek Sutkowski

Warszawa 2024



## **Opis tematu projektu**

Tramwaje często zatrzymując się na przystankach nie mogą z nich odjechać od razu po wejściu pasażerów, bo właśnie wtedy sygnały świetlne zmieniają się na zakaz wjazdu...

# Spis treści

1. Wprowadzenie do problemu.....	
2. Fazy sygnalizacji.....	
3. Rozwiązania mające na celu przyspieszenie ruchu tramwajowego w różnych miastach.....	
3.1. Poznań.....	
3.2. Kraków.....	
4. Zdefiniowanie naszych celów.....	
5. Plan realizacji.....	
6. Podział zadań i zasady współpracy.....	
7. Aspekt techniczny.....	
8. Testowanie.....	
9. Wnioski.....	
10. Bibliografia.....	

# Wprowadzenie do problemu

Pomimo tego, że tramwaje są w stanie osiągać prędkość nawet do 70 km/h, to ich średnia prędkość wynosi średnio 15 km/h.

Według artykułu Gazety Wyborczej [2] motorniczowie muszą zwalniać na wybranych odcinkach z powodu złego stanu torowisk oraz skarg mieszkańców na hałas. Pierwszy powód jest szczególnie dostrzegalny na wiadukcie w al. Jana Pawła II nad linią PKP łączący rondko Radosława z pl. Grunwaldzkim.

Jednak zły stan torów nie jest jedyną przeszkodą. Dodatkowy opóźnienia oraz coraz niższa prędkość tramwajów wynika w znacznej części z nieodpowiednio dobranej fazy świateł, oraz awaryjnych zatrzymań, spowodowanych nieuważnością oraz brawurą kierowców, jak i pieszych.

Aktualna sytuacja – zmniejszenie średniej prędkości tramwajów skutkuje nie tylko utrudnieniami, ale również jest negatywną reklamą samej Warszawy, mimo że dawniej Tramwaje Warszawskie uchodziły w Polsce za wzór [3].

Według danych z 2011 roku w Polsce ok. 28% tras tramwajowych przebiega jeszcze na jezdni ogólnej [1]. Liczba ta zmniejsza się poprzez postępujący proces modernizacji układów ulicznych. Jednym z rozwiązań, aby przyspieszyć przejazd tramwajów, byłoby więc wydzielenie torowisk jako samodzielnych przestrzeni. Może to mieć następujące formy:

- przekształcanie ulic w deptaki z zachowanym ruchem tramwajowym,
- ograniczanie dostępu samochodów do ulic,
- przenoszenie ruchu tramwajowego z ciągów ulicznych, które utraciły znaczenie komunikacyjne na nowoczesne arterie,
- przenoszenie ruchu tramwajowego w odrębną płaszczyznę.

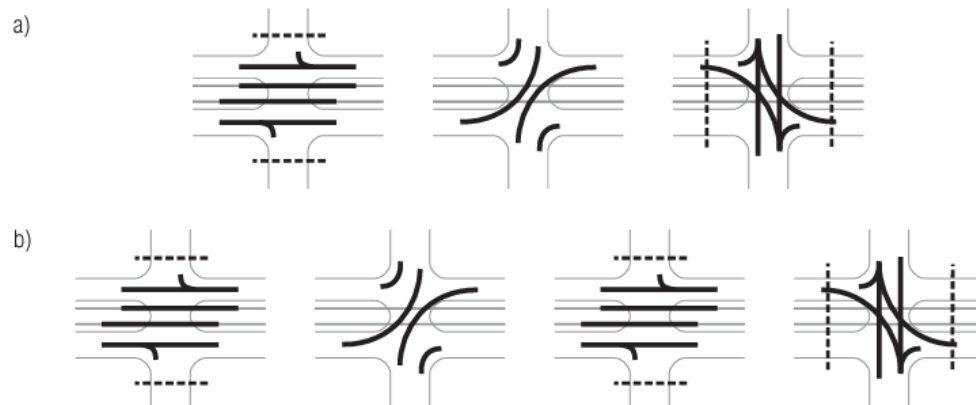
W związku z rozwojem miast konflikt tramwaj-samochód został w większości sprowadzony do skrzyżowań, co jest przedmiotem naszego projektu.

# Fazy sygnalizacji

Zostało wykazane, że bardzo korzystny dla płynności przejazd tramwajów oraz czasu oczekiwania na sygnał dopuszczający do wjazdu na skrzyżowanie, jest krótki cykl sygnalizacyjny. Wyniki analizy czasu oczekiwania i przejazdu przez skrzyżowanie z sygnalizacją widoczne są w tabeli poniżej.

Parametr	Cykl sygnalizacji [s]									
	50			70			90			
	udział sygnału dopuszczającego przejazd tramwaju [%]									
	30	50	70	30	50	70	30	50	70	
Średni czas oczekiwania przed skrzyżowaniem przy małym natężeniu ruchu tramwajów (10 poc./h)	[s]	11	6	2	17	9	3	22	11	4
Odchylenie standardowe czasu oczekiwania przed skrzyżowaniem przy małym natężeniu ruchu tramwajów (10 poc./h)	[s]	11	8	4	16	11	6	21	14	7
Przepustowość skrzyżowania w jednym kierunku	[poc./h]	210	280	360	160	250	350	150	230	310
Interwał międzykursowy odpowiadający przepustowości	[s]	18	13	10	23	15	11	24	16	12

Sam układ faz sygnalizacji wielofazowej ma znaczenie. Najkorzystniejszym rozwiązaniem z punktu widzenia tramwaju jest naprzemienny cykl dla samochodów i dla pojazdów szynowych (układ sygnalizacji z rozdzieloną fazą). Dzięki takiemu podejściu rozwiązany zostanie problem akumulacji samochodów na przejeździe (powodująca ryzyko kolizji) wynikający z pośpiechu kierowców. Innym atutem jest zmniejszenie czasu oczekiwania tramwaju na przejazd.




---

Na rysunku powyżej przedstawione zostały układy faz sygnalizacji wielofazowej: a) typowy,  
b) z rozdzieloną fazą.

Oba rozwiązania w połączeniu ze sobą spowodują zwiększenie efektywności i  
płynności ruchu drogowego.

# Rozwiązania mające na celu przyspieszenie ruchu tramwajów w różnych miastach

## 1. Poznań

---

Poznański Szybki Tramwaj (PST) to odcinek bezkolizyjnej, ułożonej w przekopie oraz estakadzie trasy tramwajowej. Sposób skonstruowania trasy pozwala na jazdę z prędkością 70 km/h. Linia powstała jako alternatywa dla znacznie droższego metra.





## 2. Kraków

---

Dawniej w Krakowie przed skrzyżowaniem mógł być wyświetlany sygnał D. Oznaczał, że motorniczy zamyka w danym momencie drzwi, a następnie bezzwłocznie rusza z przystanku.



# Zdefiniowanie naszych celów

W pierwszej fazie projektu zdefiniowaliśmy nasze ogólne cele. Są nimi:

- upłynnić ruch na skrzyżowaniach,
- zautomatyzować stare odcinki tras tramwajowych,
- rozbudować system sygnalizacji.

Następstwem powyższego etapu było zdefiniowanie grup docelowych dla naszego projektu. Wybrane profile użytkowników i zainteresowanych zostały przedstawione na grafikach poniżej (zdjęcia osób zostały wygenerowane przy pomocy sztucznej inteligencji):

	<p><b>Sebastian</b> 30 lat Obywatel m. st. Warszawa</p> <p>Sebastian codziennie wstaje dwie godziny przed pracą, gdyż jest zestresowany, że straci bonus za punktualność.</p>		<p><b>Pamela</b> 20 lat Studentka w Warszawie</p> <p>Studiuje medycynę na WUW. Przeprowadziła się na studia i przeżyła zawód związany ze skutecznością komunikacji miejskiej.</p>
<p>Dane:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- mieszka na Białołęce, dojeżdża na Śródmieście tramwajem nr 17.</li><li>- Buduje doświadczenie w rozwijającej się firmie IT</li><li>- Spłaca kredyt</li></ul> <p>Problemy:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Stres związany z niepewnością wywołaną przez funkcjonowanie ZTM</li></ul>		<p>Dane:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Codziennie dojeżdża z Annapola na uniwersytet tramwajem numer 4.</li><li>- Jest eko-świadoma, zatem zależy jej na używaniu komunikacji miejskiej.</li></ul> <p>Problemy:</p> <ul style="list-style-type: none"><li>- Zmęczona studiami medycznymi i długimi dojazdami, nie znajduje czasu na naukę.</li></ul>	



**Bogusia**  
70 lat  
Emerytka

Bogusia ma problemy zdrowotne.  
Przez swój wiek jest zmuszona  
korzystać z komunikacji miejskiej.

Dane:

- Jej mąż zmarł cztery lata temu.  
Bogusia często odwiedza jego grób.
- Regularnie musi dojeżdżać do lekarza.
- Nie posiada samochodu, nie ma krewnych w mieście.

Problemy:

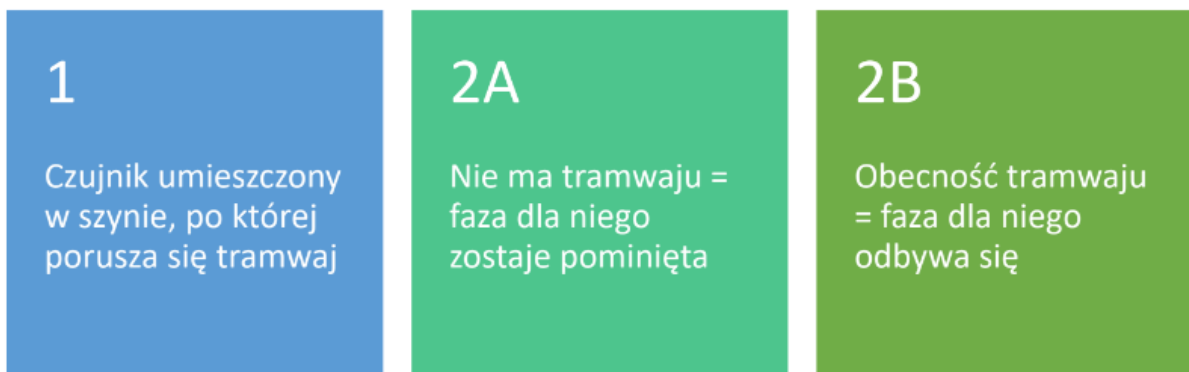
- Zmęczona wydłużającymi się podróżami tramwajem.

Definiując nasze cele, przeprowadziliśmy burzę mózgów. W jej wyniku wypisaliśmy pierwsze pomysły. Również w tej fazie pojawiły się w naszych głowach pierwsze pomysły realizacji naszych celów:

- automatyczne dobieranie trasy do przystanku,
- separacja torów od jezdni,
- wykorzystanie sztucznej inteligencji do usprawnienia ruchu,
- latające tramwaje,
- zmiany tras tramwajów,
- synchronizacja świateł z rozkładami jazdy tramwajów,
- szlabany blokujące przejazd samochodom.

# Plan realizacji

Na podstawie przeprowadzonych przez nas dyskusji, jak i dzięki inspiracji źródłami naukowymi, wypracowaliśmy ogólną koncepcję rozwiązania przedstawioną na grafice poniżej.



Następnie zdefiniowaliśmy funkcjonalności krytyczne oraz funkcjonalności dodatkowe.

Funkcjonalności krytyczne	Funkcjonalności dodatkowe
Wykrywanie tramwaju	Rogatki
Sterowanie światłami	Sygnał dla kierowców
Zwiększenie częstotliwości fazy tramwaju	

# **Podział zadań i zasady współpracy**

## **1. Piotr Szkoda**

- Finalna wersja kodu sterującego ruchem,
- Podłączenie przycisku oraz sygnalizacji świateł, tak aby poprawnie ze sobą funkcjonowały,
- Research na temat możliwości zaprezentowania naszego systemu na prezentacji końcowej,
- Organizacja spotkań/briefingów,
- Sprawozdanie techniczne.

## **2. Kornelia Błaszczuk**

- Przygotowanie materiału do przedstawienia na prezentacji połówkowej,
- Pierwszy prototyp kodu sygnalizacja-przycisk,
- Research na temat komunikacji sygnalizacji z tramwajem,
- Sprawozdanie,
- Efekty specjalne na prezentacji końcowej; reklama naszego stanowiska,
- Tworzenie notatek ze spotkań z opiekunem.

## **3. Paweł Spirydowicz**

- Research na temat systemu podnoszenia barierki przed przejazdami,
- Sposoby na realizację powyższej funkcjonalności dodatkowej,
- Prezentacja końcowa – slajdy reklamujące nasz projekt,
- Przeprowadzenie i udokumentowanie testów,
- Pomoc przy realizacji makiety.

#### **4. Clara Chami**

- Projekt makiety,
- Realizacja makiety i analiza poprawności kodu światła-przycisk na podstawie wybranego skrzyżowania,
- Przygotowanie materiału do przedstawienia na prezentacji połówkowej.
- Pilnowanie porządku na spotkaniach oraz zrealizowanych na nich założonych wcześniej celów.

#### **5. Anton Basan**

- Research na temat możliwości podłączenia świateł i przycisku,
- Realizacja wizualnego aspektu świateł na makiecie,
- Pomoc innym członkom grupy w realizacji ich zadań,
- Przeprowadzenie i udokumentowanie testów,
- Ocena sprawozdania pod kątem merytorycznym.

Jako zespół ustaliliśmy **zasady współpracy**, aby zagwarantować spokojną i efektywną realizację projektu:

- dzielimy się równo zadaniami,
- w przypadku problemów od razu to zgłaszamy,
- nie robimy znaczących zmian w projekcie bez zgody współtwórców,
- zawsze się wspieramy,
- przede wszystkim dobra atmosfera

# Aspekt techniczny

## 1. Zrealizowane funkcjonalności

### Krytyczne

- Wykrywanie Tramwajów
- Kontrola sygnalizacji świetlnej
- Faworyzacja ruchu tramwajów

### Opcjonalne:

- Dodatkowe informacje dla maszynisty

## 2. Architektura systemu

- **mikrokontroler ESP-32:** Główny kontroler systemu, który zarządza wejściami (przyciski monostabilne) oraz wyjściami (led, oled).
- **3x ekran micro-oled:** Sygnalizacja stanu świateł oraz wyświetlanie informacji dla maszynistów z czasem do zmiany sygnalizacji.
- **3x zielona/czerwona dioda LED:** Sygnalizacja stanu świateł dla samochodów.
- **6x opornik:** Zapobieganie przepaleniu diód led.
- **6x przycisk monostabilny:** Symulacja wykrywania tramwajów w każdym z kierunków na wjeździe i wyjeździe

## 3. Realizacja (kod znajduje się w sekcji *Bibliografia*)

Model projektu zakłada skrzyżowania składające się z 3 ulic, w tym jednej prostopadłej do dwóch pozostałych zezwalając na ruch tramwajowo-samochodowy w każdy z dostępnych kierunków. Przykładowa realizacja przedstawia umieszczenie detektorów jak i przystanków przed wjazdem na skrzyżowanie, co pozwala na wyświetlenie informacji i dostosowanie czasu oczekiwania umożliwiając postój. W obecnej formie system przewiduje standardowo 20 sekund na zmianę fazy symulując normalny przebieg sygnalizacji. Natomiast

po wykryciu tramwaju przewidziane 10 sekund na postój przed zmianą fazy na taką, która by faworyzowała kierunek, z którego nadjechał tramwaj. Po wykryciu zjazdu tramwaju ze skrzyżowania ruch zostaje przywrócony do normalnego obiegu faz po 3 sekundach. Z oczywistych przyczyn prezentacji modelu czasy oczekiwania zostały znacząco skrócone.

Bazując na tej idei zaprojektowany został algorytm w języku MicroPython pozwalający na obsługę nie tylko opisanego scenariusza, lecz także łatwą rozbudowę systemu w zależności od wymagań danej implementacji. Algorytm działa z wykorzystaniem mikrokontrolera esp32, do którego bezpośrednio podłączone zostały wszystkie wymienione wyżej elementy.

	Samochód od północ	Samochód od południe	Samochód od wschód		Tramwaj z północ	Tramwaj z południe	Tramwaj z wschód
<b>Faza 1</b>	zielone	czerwone	czerwone		wszędzie	stop	stop
<b>Faza 2</b>	zielone	zielone	czerwone		prosto	prosto	stop
<b>Faza 3</b>	czerwone	zielone	czerwone		stop	wszędzie	stop
<b>Faza 4</b>	czerwone	czerwone	czerwone		stop	stop	wszędzie
<b>Faza 5</b>	czerwone	czerwone	zielone		stop	stop	wszędzie

Tabela prezentująca przebieg faz sygnalizacji.

#### 4. Schemat połączeń

Wszystkie piny zostały podane w kolejności dla kierunków: północ/południe/zachód

- **Micro-oled (SCL, SDA)**
  - północ (32, 33)
  - południe (23, 27)
  - wschód (4, 5)



- **Przyciski monostabilne**
  - północ wjazd (3.3v, 13)
  - północ wyjazd (3.3v, 14)
  - południe wjazd (3.3v, 16)
  - południe wyjazd (3.3v, 17)
  - wschód wjazd (3.3v, 12)
  - wschód wyjazd (3.3v 15)
- **Led** (zielony, czerwony)
  - północ (18, 19)
  - południe (21, 22)
  - wschód (25, 26)

# Testowanie

Aby sprawdzić poprawność działania naszej makiety, przeprowadziliśmy szereg testów mających na celu wychwycenie ewentualnych błędów oraz zdarzeń niepożądanych.

**Testowanie składało się z dwóch etapów:**

1. Przeprowadzone przez nas (twórców),
2. Przeprowadzone przez grupę 5 osób z kierunku studiów Informatyka prowadzonych na Politechnice Warszawskiej na Wydziale Elektroniki i Technik Informacyjnych.

W ich wyniku błędów zostały wychwycone sporadyczne nieprawidłowości, takie jak: jednorazowe niestykanie się elementów elektronicznych. Napotkane błędy zostały naprawione, po czym przeprowadziliśmy wybrany test ponownie.

Po przygotowaniu prototypu udostępniliśmy go do wypróbowania naszym kolegom i koleżankom z kierunku. W rezultacie dostaliśmy informacje zwrotną od grupy docelowej – ludzi korzystających z tramwajów.

Dzięki naszym testom zyskaliśmy pewność, co do implementacji naszych rozwiązań, ich wydajności oraz potencjalnych problemów mogących zaistnieć przy realizacji naszego projektu w rzeczywistości.

<b>Nr</b>	<b>Warunki testów</b>	<b>Oczekiwany wynik</b>	<b>Wynik</b>
<b>1</b>	Tramwaj nadjeżdża z <b>PÓŁNOCY</b>	Oczekiwanie 10 sekund, przechodzenie do fazy 1	<b>Sukces</b>
<b>2</b>	Tramwaj nadjeżdża z <b>PÓŁNOCY</b> i wyjeżdża w dowolnym kierunku	Oczekiwanie 5 sekund, przechodzenie do fazy 2, wznawianie pętli faz	<b>Sukces</b>
<b>3</b>	Tramwaj nadjeżdża z <b>POŁUDNIA</b>	Oczekiwanie 10 sekund, przechodzenie do fazy 3	<b>Sukces</b>

<b>4</b>	Tramwaj nadjeżdża z <b>PÓŁUDNIA</b> i wyjeżdża w dowolnym kierunku	Oczekiwanie 5 sekund, przechodzenie do fazy 4, wznowianie pętli faz	<b>Sukces</b>
<b>5</b>	Tramwaj nadjeżdża ze <b>WSCHODU</b>	Oczekiwanie 10 sekund, przechodzenie do fazy 4	<b>Sukces</b>
<b>6</b>	Tramwaj nadjeżdża ze <b>WSCHODU</b> , wyjeżdża w dowolnym kierunku	Natychmiastowe przechodzenie do fazy 1	<b>Sukces</b>
<b>7</b>	Wykrycie tylko wyjazdu	Brak zmiany faz	<b>Sukces</b>
<b>8</b>	Wykrycie dwóch tramwajów jednocześnie	Pierwszy tramwaj ma 10 sekund na zjechanie, drugi oczekuje	<b>Sukces</b>

# Wnioski

Nie ukrywamy, że efekt finalny naszego projektu napawa nas dumą. Uważamy, że pozwolił się nam on rozwinąć, nie tylko w aspekcie technicznym, ale również nauczył nas pracować w zespole, co oczywiście nie zawsze jest łatwe. Jednak wspólnymi siłami udało nam się osiągnąć efektywny i efektowny projekt, który z dumą przedstawimy już 29 stycznia 2024.

Napotkaliśmy pewne problemy związane z realizacją techniczną naszej koncepcji. W ich wyniku byliśmy zmuszeni do rezygnacji lub modyfikacji z pewnych pomniejszych elementów.

Na etapie podłączenia świateł oraz przycisków zmierzaliśmy się z problemem za małej ilości pinów na ESP32. Mieliśmy w tamtym momencie dwie opcje: połączenie dwóch ESP32 lub zrezygnowanie z żółtych świateł. Mimo researchu na temat pierwszego rozwiązania nie znaleźliśmy dużo informacji, co więcej ograniczał nas czas. Zdecydowaliśmy się więc na rezygnację z żółtych świateł na rzecz naszej prezentacji, z racji, że w świecie rzeczywistym służą one do ostrzegania o zmianie świateł.

W momencie rozpoczęcia prac nad makietą okazało się, że nasz kod ma niepoprawną koncepcję torów, przez co musieliśmy go delikatnie zmodyfikować. Nie zajęło nam to jednak dużo czasu, ani nie spowodowało żadnych długoterminowych konsekwencji.

Niestety na etapie expo, gdzie pokazywane były projekty w ramach przedmiotu PZSP1, musieliśmy zmierzyć się z problemami. W momencie transportu odłączyły się kable pomiędzy światłami a ESP32. W wyniku tego nasza makietka nie przybrała takiej postaci, jakiej byśmy sobie życzyli. Natomiast mimo problemów poradziliśmy sobie z problemem i mogliśmy zaprezentować nasz projekt z pełnym sukcesem.

Jeśli chodzi o naszą koncepcję, to uważamy ją za dobrze stworzoną. W naszej ocenie przemyśleliśmy każdą możliwość zdarzenia drogowego, które może wystąpić.

W kolejnych etapach rozwoju projektu, który obsługiwałby ruch rzeczywisty, chcielibyśmy zastosować system GPS znajdujący się w pojazdach komunikacji miejskiej w Warszawie. Dzięki niemu moglibyśmy rozszerzyć nasz projekt oraz zwiększyć jego efektywność. Wtedy system mógłby rozpoznawać linię tramwaju, dzięki czemu dostawalibyśmy dodatkowe informacje o trasie tramwaju, o tym czy jedzie prosto, czy skręca. Dzięki temu system byłby wydajny.

Chcielibyśmy również rozszerzyć nasz kod o obsługę skrzyżowań typu rondo, które oczywiście różnią się od zwykłego skrzyżowania oraz występują w wielu wariantach. Myślimy również o stworzeniu całej bazy z różnymi rodzajami skrzyżowań i fazami dla nich.

Podsumowując, dzięki projektowi zyskałoby wiele umiejętności, które przydadzą się nam w przyszłości w życiu codziennym, jak i zawodowym.

## **Bibliografia:**

- [1] <https://www.infona.pl/resource/bwmeta1.element.baztech-article-BPK3-0008-0057>
  
- [2] <https://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,30600282,choinka-znakow-nad-torami-i-tramwaje-zwalniaja-juz-do-10-km.html>
  
- [3] [https://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,29302059,coraz-wiecej-ograniczen-predkosci-dla-tramwajow-w-warszawie.html#S.embed\\_link-K.C-B.1-L.1.zw](https://warszawa.wyborcza.pl/warszawa/7,54420,29302059,coraz-wiecej-ograniczen-predkosci-dla-tramwajow-w-warszawie.html#S.embed_link-K.C-B.1-L.1.zw)

## **Kod z realizacją:**

<https://gitlab-stud.elka.pw.edu.pl/kblaszcz/kapibara-tramwajara>