

Włodzimierz Choromański
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

Jerzy Kowara
Politechnika Warszawska, Wydział Transportu

KONCEPCJA STRUKTURY SIECI TOROWEJ DLA POJAZDÓW PRT

Streszczenie: Referat dotyczy wybranych zagadnień modelowania sieci torowej dla transportu Personal Rapid Transit. Praca obejmuje krótką charakterystykę transportu PRT, omówienie wybranych wymagań oraz opis propozycji struktury torowej systemu PRT. Ponadto zawiera metodykę modelowania toru z uwzględnieniem krzywych przejściowych. Przedstawione zagadnienia stanowią integralną część prac związanych z opracowaniem koncepcji systemu PRT. Zaprezentowane modele toru są wykorzystywane w zaawansowanych badaniach symulacyjnych zarówno pojazdów jak i całego systemu PRT.

Słowa kluczowe: Personal Rapid Transit, system PRT, struktura sieci torowej, model geometryczny toru, modelowanie krzywej przejściowej

1. WSTĘP

Transport Personal Rapid Transit określany mianem PRT jest jedną z form transportu automatycznego określanego mianem AGT ("Automated Guidway Transit" - automatyczny transport prowadzony bez motorniczego) [1], który wykazuje cechy transportu osobistego i masowego transportu miejskiego typu "point to point" lub "door to door", na który składają się małe pojazdy (np. czteroosobowe), poruszające się zdalnie po lekkiej infrastrukturze - najczęściej szynie napowietrznej. Natomiast funkcja "point to point" oznacza, że przejazd odbywa się od przystanku początkowego do końcowego bez przystanków pośrednich. Inteligentny system sam wybiera optymalną trasę przejazdu, która w danej chwili w zależności od zajętości sieci „dróg”, pozwoli spełnić kryterium: minimum czasu podróży.

Na wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej od kilku lat prowadzone są prace w zakresie modelowania i badań dynamiki ruchu pojazdów systemu PRT. W ramach obecnie realizowanego projektu ECO-Mobilność (projekt realizowany w ramach programu

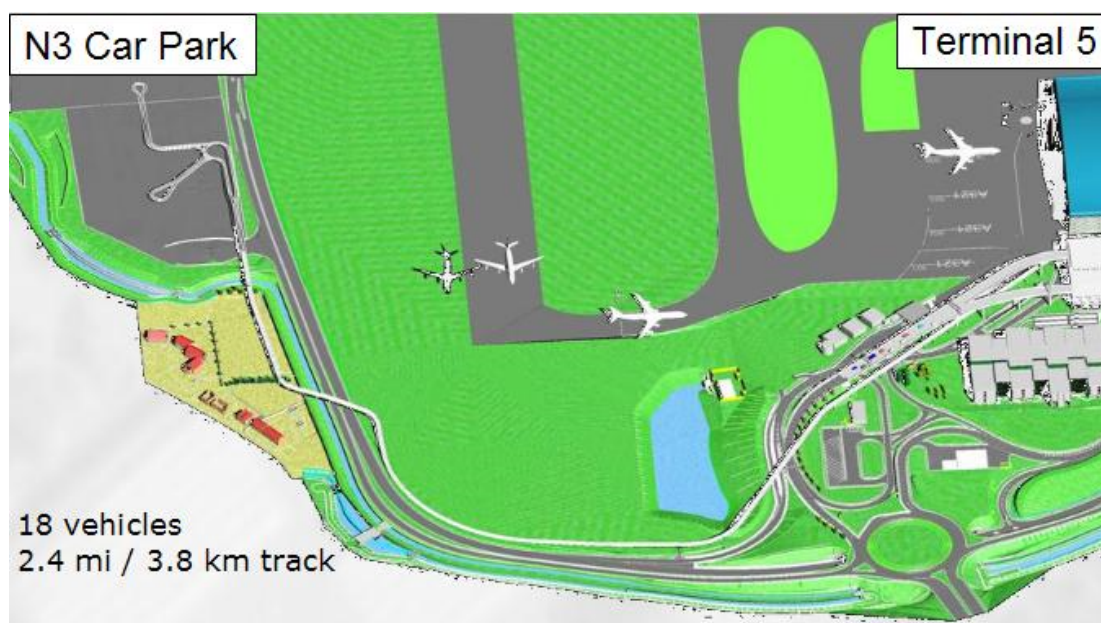
operacyjnego Innowacyjna Gospodarka, działanie 1.3) opracowana zostanie koncepcja konstrukcji układu jezdni pojazdu PRT oraz propozycja struktury torowej dla systemu transportu.

1.1. Przykłady sieci systemów PRT

System transportu PRT jest znany na świecie od wielu lat. Jedną z pierwszych prac badawczych dotyczących tego rodzaju transportu realizowano w USA w latach 1968-1976, a jej wyniki opublikowano w monografii [1]. Pomimo upływu wielu lat system ten nadal znajduje się głównie na etapie koncepcji i badań. Jedynym rozwiązaniem o nazwie Ultra jest obecnie wdrażane do lokalnej eksploatacji na lotnisku Heathrow.

Jak wynika z analizy prowadzonych na świecie prac badawczych i rozwiązań patentowych struktura sieci torowej realizowana jest w oparciu o różnorodne koncepcje. Występują rozwiązania zarówno z torem dwukierunkowym jak i jednokierunkowym. Problemem, który powtarza się najczęściej są rozjazdy, które projektowane są bez części ruchomych w torze w układzie tzw. pasywnego rozjazdu (z ang.: passive switch).

Z analizy współcześnie projektowanych systemów wynika, że w większości rozwiązań przyjmowana jest opcja toru jednokierunkowego z pasywnym rozjazdem czego przykładem jest system o nazwie Vectus, który badany jest od wielu lat na torze testowym w Upsali w Szwecji oraz wspomniany już system Ultra. W obydwu wymienionych przypadkach opracowana trasa przejazdu pojazdów jest w postaci pętli, na której znajduje się kilka przystanków. Na Rys. 1 przedstawiono schemat sieci systemu Ultra, który łączy Terminal 5 lotniska Heathrow z parkingiem oznaczonym numerem N3. Na trasie przewidziano 3 przystanki, z których dwa znajdują się na parkingu N3 i jeden na Terminalu 5.



Rys. 1. Sieć dróg systemu transportu Ultra na lotnisku Heathrow (www.ultraprt.net)

2. MODELOWANIE STRUKTURY SIECI

Modelowanie i projektowanie dróg, zarówno kolejowych jak i samochodowych ma duże tradycje oraz wypracowane modele i schematy. W transporcie PRT w tym zakresie spotykamy się z pewną luką i brakiem odpowiednich wytycznych, a szczególnie wzorców i przyjętych standardów. Niniejsza praca podejmuje próbę rozwiązania zagadnienia modelowania struktury sieci systemu PRT w aspekcie podejmowanych później badań dynamiki ruchu pojazdu oraz badań symulacyjnych sterowania ruchem pojazdów i przepustowości sieci.

W punktach poniżej opisano wstępne wymagania i założenia, proponowany schemat sieci oraz model geometryczny wybranego do badań odcinka toru.

2.1. Wybrane wymagania i założenia

Wymagania i założenia mogą być definiowane na różnych płaszczyznach i zakresach. W niniejszym punkcie zwięźle przykłady wymagań w zakresie komfortu i bezpieczeństwa pasażerów oraz w zakresie wymagań i założeń w odniesieniu do sterowania pojazdami.

Dla systemu PRT brak jest dedykowanych norm i wytycznych w zakresie projektowania toru w aspekcie komfortu i bezpieczeństwa pasażerów. W projektowanym modelu ze względu na komfort pasażerów założono dopuszczalne wartości:

- przyspieszenia dośrodkowego 1 m/s^2
- prędkości narastania przyspieszenia dośrodkowego $0,8 \text{ m/s}^3$

Wartości te przyjęto zgodnie z wymaganiami stawianymi dla dróg kolejowych [2]. W pracy [3] przedstawiono wytyczne dla pojazdów w transporcie sterowanym automatycznie, dotyczą one jednak bardziej wymagań w zakresie określania charakterystyk ruchowych niż projektowania torów.

Jednym z najważniejszych problemów systemu PRT jest zapewnienie takiego sposobu sterowania ruchem pojazdu w rozjazdach, aby nie wymagał on znacznego zmniejszenia prędkości jazdy oraz gwarantował szybkie przeprowadzenie manewru zmiany kierunku ruchu. Dla spełnienia tych warunków, wydaje się koniecznym przeniesienie zwrotnicy tradycyjnie związanej z torem (prowadnicą) do pojazdu. Takie rozwiązanie nie wymaga instalowania jakichkolwiek elementów ruchomych na torach (prowadnicach). Tory pozostają ciągle w tej samej konfiguracji bez względu na kierunek przejazdu kolejnych pojazdów. Tym samym tor jest zawsze gotowy na wjazd kolejnego pojazdu i nie jest konieczne oczekiwanie na zmianę jego konfiguracji po przejeździe pojazdu zmieniającego kierunek jazdy.

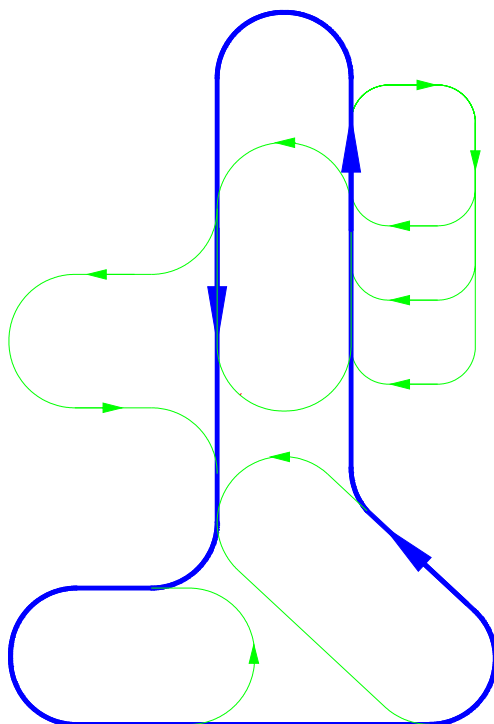
Spełnienie opisanych powyżej wymagań wiąże się z przemieszczaniem elementów układu napędowo – jezdnych pojazdów w trakcie jazdy oraz ruch pojazdów bez znacznego zmniejszenia prędkości jazdy w rozjazdach i krzywych przejściowych. Ponadto konstrukcja układu napędowo- jezdnych musi umożliwiać jazdę w torze o małych promieniach krzywizny. Tak szeroki zakres wymagań i warunków pracy/jazdy powoduje utrudnienia w budowie pojazdu, który spełniać musi wymagania w zakresie komfortu i bezpieczeństwa przewożonych osób, w tym dopuszczalnych przyspieszeń i prędkości narastania przyspieszeń.

2.2. Proponowany schemat sieci

Układ torów oraz system sterowania będą ściśle związane z przeznaczeniem kolejki oraz warunkami terenowymi. Na wstępnym etapie uznano za niecelowe rozpatrywanie sieci bardzo złożonych z uwagi na brak szczegółowych danych. Opisane zagadnienia mają wprowadzić w problematykę i pozwolić na zebranie doświadczeń a w rozwiązaniach najprostszych najłatwiej zauważyć popełnione błędy i je usunąć.

Proponowany na Rys. 2 schemat sieci spełnia poniższe wymagania:

- 1) Ruch pojazdów odbywa się po wydzielonych trasach, niekolidujących z innymi trasami komunikacyjnymi umożliwiając jednocześnie przechodzenie pasażerów z jednego systemu transportu do drugiego,
- 2) Ruch pojazdów odbywa się w jednym kierunku,
- 3) Sieć torów/dróg złożona jest z pętli, które mogą być dowolnie dopasowywane do istniejących warunków lokalnych
- 4) Układ tras przejazdu umożliwia dotarcie do wielu określonych punktów w obszarze sieci torów/dróg systemu,
- 5) W zależności od rozległości sieci, w proponowanej strukturze można wyodrębnić część toru, która stanowi tzw. magistralę, na której ruch pojazdów odbywa się z podwyższoną prędkością do 50 km/h.

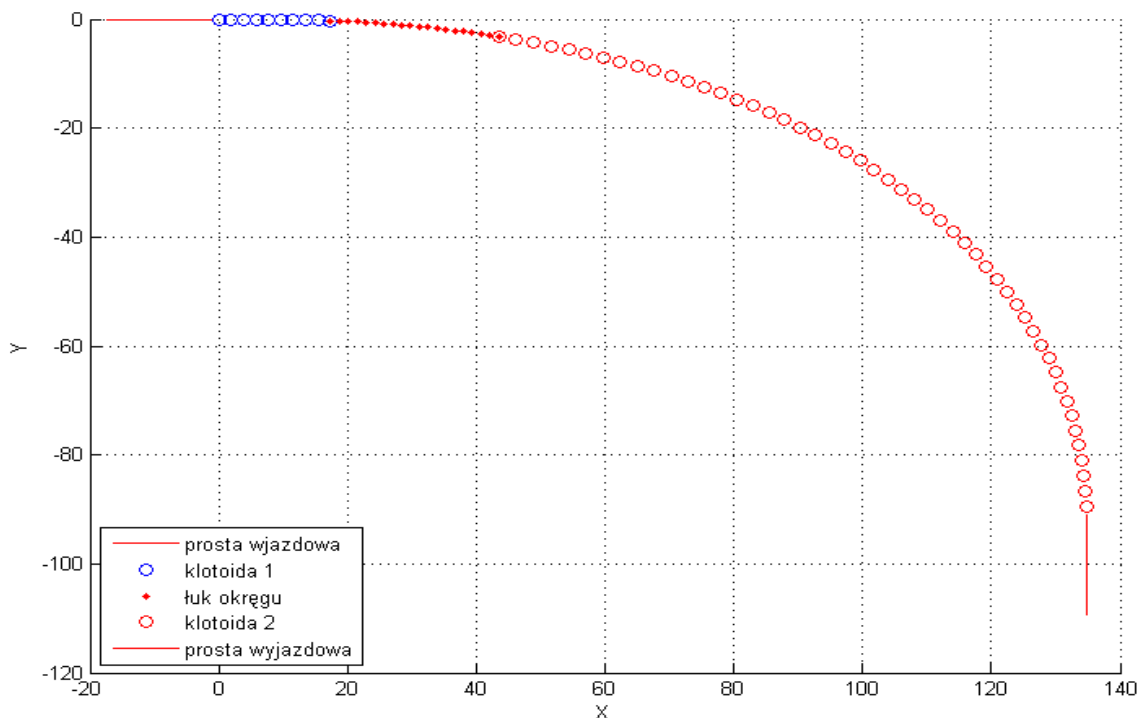


Rys. 2. Proponowany schemat dwuwarstwowej sieci dla systemu transportu PRT

Niniejsze opracowanie stanowi wstęp do projektu technicznego, który może być podstawą do dalszych prac mających na celu wdrożenie systemu w określonych warunkach.

2.3. Model geometryczny toru

Z analizy przedstawionej w punkcie 2.2 sieci wybrano do modelowania odcinek toru, który obejmuje przejazd pojazdu przez rozjazd obejmujący skręt o 90° . przy jednoczesnym zmniejszaniu prędkości pojazdu. Parametrami wyjściowymi do opisu geometrii rozjazdu były dopuszczalne wartości przyrostu przyspieszenia dośrodkowego i prędkości narastania przyspieszenia dośrodkowego opisane w punkcie 2.1. Model geometryczny toru przedstawiony na Rys. 3 obejmuje elementy, które pozwalają przeprowadzić analizę dynamiki przy przejeździe przez pasywny rozjazd (tzw. passive switch), w ruchu w obrębie krzywych przejściowych oraz toru o stałym promieniu krzywizny. Taki opis modelu uwzględnia specyfikę dwuwarstwowej sieci (Rys. 2), w której ważnym elementem jest manewr zjazdu z warstwy podwyższonej prędkości na wolną warstwę. Ponadto geometria toru musi uwzględniać prędkości ruchu pojazdów i wymagania w zakresie oddziaływań dynamicznych na pasażerów.



Rys. 3. Modelowany odcinek toru obejmujący skręt w prawo o 90°

Z uwagi na istotne wartości takich wielkości, jakimi są przyspieszenie i narastanie przyspieszenia [2], spośród różnych krzywych możliwych do zastosowania, jako krzywej przejściowej do połączenia odcinka prostego z łukiem kołowym, wybrano klotoidę. Długość krzywej określono z zależności:

$$l_{\min} = \frac{V^3}{\Psi R} \quad (1)$$

gdzie, dla wymienionych powyżej wielkości otrzymujemy:

l_{\min} – minimalna długość krzywej przejściowej 17.361 m,
 V – prędkość przejazdu 13.89 m/s,
 Ψ – prędkość narastania przyspieszenia 0.8 m/s³,
 R – promień łuku 192.901 m wyznaczony dla $a=1\text{m/s}^2$

Kłotoida jest krzywą przejściową której promień krzywizny jest odwrotnie proporcjonalny do długości łuku. Z własności tej wynika jednostajny przyrost siły dośrodkowej działającej na pojazd poruszający się po krzywej.

Kłotoida opisywana jest równaniem:

$$C = R_K \cdot l_K = const \quad (2)$$

gdzie:

C – parametr kłotoidy,
 R_K – promień krzywizny kłotoidy,
 l_K – długość kłotoidy.

We współrzędnych prostokątnych równanie kłotoidy opisuje zależność:

$$\begin{aligned}
 x &= l \left(1 - \frac{l^4}{40C^2} + \frac{l^8}{3456C^4} - \frac{l^{12}}{599040C^6} + \dots \right) \\
 y &= \frac{l^3}{2C} \left(\frac{1}{3} - \frac{l^4}{168C^2} + \frac{l^8}{21120C^4} - \frac{l^{12}}{9676800C^6} + \dots \right)
 \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

l – bieżąca długość kłotoidy.

Połączenie odcinka prostego z łukiem kołowym za pośrednictwem kłotoidy wymaga więc przesunięcia środka okręgu o parametry wyznaczone z zależności:

$$\begin{aligned}
 m &= \frac{l_K}{2} \left(1 - \frac{l_K^2}{120R^2} + \frac{l_K^4}{17280R^4} - \dots \right) \\
 p &= \frac{l_K^2}{24R} \left(1 - \frac{l_K^2}{120R^2} + \frac{l_K^4}{21120R^4} - \dots \right)
 \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie:

m – współczynnik przesunięcia kłotoidy w kierunku osi x $m=8.679$ m,
 p – współczynnik przesunięcia kłotoidy w kierunku osi y $p=0.065$ m,
 l_K – całkowita długość kłotoidy $l_K=l_{\min}$,
 R – promień łuku kołowego.

Biorąc pod uwagę, że badany pojazd w trakcie zmiany kierunku ruchu (opuszczania toru jazdy o stałej prędkości V) będzie zmniejszał prędkość, przyjęto umownie wartość odległości od toru prostego toru $H = 3$ m po przekroczeniu której będzie mogło nastąpić zmniejszanie jego prędkości jazdy. Taki warunek pozwala nie utrudniać ruchu pojazdom jadącym za pojazdem zmieniającym kierunek ruchu (zjazd z magistrali głównej). Z

powyższego warunku wynika jednoznacznie, że do czasu jego spełnienia ruch musi odbywać się po torze o stałym promieniu krzywizny R aby nie przekroczyć dopuszczalnych wartości przyspieszenia odśrodkowego.

W trakcie symulacji wyznaczono wartość kąta $\alpha = 0.13$ [rad] łuku o stałym promieniu krzywizny, dla którego H (odsunięcie od toru głównego) spełniła warunek $H > 3m$.

$$H = R(1 - \cos(\alpha + \varphi_K)) + p \quad \text{gdzie} \quad \varphi_K = \frac{l_K}{2R} \quad (5)$$

gdzie:

- H – odsunięcie od toru głównego,
- α – kąt łuku przy którym wartość $H = 3m$,
- φ_K – kąt początku łuku kołowego.

Korzystając z równania okręgu wyznaczono kolejne punkt łuku o stałym promieniu krzywizny, przyjmując wartości kąta łuku od φ_K do φ_1 przyjmując:

$$\varphi_1 = \varphi_K + \alpha \quad (6)$$

Powyższe wartości pozwoliły wyznaczyć punkt końcowy łuku o stałym promieniu, który jednocześnie jest punktem początkowym następnej klotoidy, na której będzie odbywał się ruch ze zmniejszaniem prędkości jazdy. Wyznaczono parametry stałe i początkowe klotoidy 2 oraz założono parametr końcowy $\varphi_2 = 90^\circ$ dla którego długość klotoidy wynosi l_2 .

Założono, że prędkość jazdy w trakcie przemieszczania się po klotoidzie 2 zmniejszy się do $V_k=20$ km/h.

Wartości parametrów określających drugą krzywą przejściową (klotoida 2) przedstawiono w Tabelicy 1:

Tablica 1.

Lp.	Nazwa wielkości	parametry	
		symbol	wartość
1	Początkowa długość klotoidy 2 [m]	l_1	67.515
2	Początkowy kąt klotoidy 2 [rad]	φ_1	0.175
3	Współczynnik przesunięcia klotoidy 2 w kierunku osi x [m]	m_1	33.723
4	Współczynnik przesunięcia klotoidy 2 w kierunku osi x [m]	p_1	0.984
5	Końcowa długość klotoidy 2 [m]	l_2	202.276
6	Parametr klotoidy 2	C_2	13023.81

Opracowany powyżej model toru, którego geometria przedstawiona na Rys. 3 stanowi wymuszenie kinematyczne dla modelu dynamicznego pojazdu PRT został wykorzystany podczas badań symulacyjnych dynamiki ruchu modelu pojazdu Personal Rapid Transit. Otrzymane wyniki potwierdziły poprawność doboru parametrów oraz konieczność stosowania powyżej opisanej geometrii.

3. PODSUMOWANIE

System transportu PRT może stanowić element uzupełniający komunikacji miejskiej lub transport zasadniczy na obszarach turystycznych czy wystawowych itp. Niniejsze opracowanie jako projekt studyjny stanowi wstęp do projektu technicznego mogącego który może być podstawą do wdrożenia systemu w określonych warunkach zapotrzebowania. Ponadto zaprezentowane wyniki będą wykorzystane podczas budowy modelu systemu PRT w skali.

Wybrane parametry proponowanej struktury sieci przedstawiono w Tabelicy 2.

Tablica 2.

Lp.	PARAMETRY/CECHY	WARSTWA	
		L1	L2
1	Maksymalna prędkość jazdy V_{max} [km/h]	50	25-30
2	Minimalny promień krzywizny toru R_{min} [m]	100	5
3	Maksymalne nachylenie wzdłużne toru [%]	± 1	± 5
4	Ruch dwukierunkowy	NIE	NIE
5	Przystanki z wycofywaniem	NIE	TAK
6	Rozjazdy krzyżowe	NIE	NIE
7	Rozjazdy zwykłe	TAK	TAK

Praca powstała w związku z realizacją Projektu nr UDA – POIG.01.03.01-14-154/09-00 pt: „ECO-Mobilność” - kierownik projektu W. Choromański . Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka.

Bibliografia

1. Irving J., et al.: Fundamentals of Personal Rapid Transit, D.C. Heath and Company, 1978.
2. Sysak J., et al.: Drogi kolejowe, PWN, Warszawa 1986.
3. Vuchic V.: Urban Transit Systems and Technology, John Wiley & Sons, Inc., USA 2007.
4. www.ultraprt.net.

THE TRACK CONCEPT OF PERSONAL RAPID TRANSIT SYSTEM

Abstract: The paper concerns the conceptual and modelling track researches. A brief characterization of PRT transport has been presented indicating the problems of track structures and vehicle dynamics. Also the concept structure of track system has been outlined based on the PRT researches. Some aspects of the design of spiral transition curves on PRT tracks are discussed.

Keywords: Personal Rapid Transit, track of PRT, geometric parameters of track, transition curves in PRT track design