

# Koncepcja sterowania i zarządzania ruchem drogowym w systemie PRT

JEL: R41 DOI: 10.24136/atest.2019.184

Data zgłoszenia: 05.04.2019 Data akceptacji: 26.06.2019

W artykule przedstawiono analizę informatycznego systemu sterowania i zarządzania ruchem PRT (ang. *Personal Rapid Transit*). Zdefiniowano pojęcie systemu PRT, przeprowadzono przegląd tych systemów oraz ich struktury. Dokonano genezy zastosowania systemów informatycznych sterowania i zarządzania ruchem PRT. Opisano układy mechaniczne i ergonomiczne dedykowanych pojazdów. Scharakteryzowano strukturę układu jezdni oraz ergonomię kabin pojazdu PRT. Opisano proces szacowania warunków ruchu oraz dokonano symulacji przykładowych pojazdów. Dokonano analizę systemu PRT, którego celem jest określenie optymalnej liczby stacji PRT gwarantujących optymalne zapewnienie usługi, pod względem natężenia popytu na usługi PRT. Zilustrowano etapy projektowania systemu cyrkulacji PRT dla dzielnic na obrzeżach miasta. Posłużono się narzędziem informatycznym programu OPTIMAL (C-CAD).

**Słowa kluczowe:** zindywidualizowany transport miejski PRT, transport.

## Wstęp

Motywy podjęcia problematyki PRT (ang. *Personal Rapid Transit*) jest zainteresowanie autorów artykułu potrzebami zwiększonej obsługi transportu miejskiego, przy wyższym niż dotychczas poziomie jego obsługi. Jest to szczególnie ważne w szczytowych okresach natężenia ruchu, gdy transport samochodowy jest nękany problemami korków, a duże miasta niewspółmiernym zanieczyszczeniem powietrza i stratami energii. Jednocześnie PRT to system, który podobnie jak samochody, jest wygodny, nie wymaga czekania, a także zapewnia prywatność, co jest największym minusem współczesnej komunikacji. Dodatkowo system PRT powinien generować niskie koszty eksploatacji, cichą i ekologiczną obsługą, poprzez redukując zanieczyszczenia powietrza, łagodzi zależność od ropy naftowej [2], [3], [7], [11], [14], [16], [17], [25] oraz [27].

Jednym z najważniejszych problemów w systemach PRT jest zapewnienie takiej metody kierowania pojazdami PRT na połączeniach, które nie powodują zmniejszenia prędkości i gwarantują szybką zmianę kierunku. Aby sprostać tym warunkom, konieczne wydaje się przeniesienie przełącznika, który tradycyjnie jest dołączony do prowadnicy toru, do samego pojazdu. To rozwiązanie nie wymaga konstrukcji żadnych ruchomych elementów na prowadnicy. Ścieżka jest zawsze gotowa na kolejny pojazd i nie trzeba czekać na zmianę jego konfiguracji po zmianie pojazdu. Zgodność z wyżej wymienionymi wymaganiami jest ściśle związana z przesunięciami elementów systemu wózków w czasie podróży i jazdy bez znacznego spadku prędkości na połączeniach i krzywych przejściowych. Ponadto budowa systemu pojazdów musi ułatwić jazdę na torach o małych promieniach. Takie wymagające wymagania i warunki jazdy powodują, że trudno jest skonstruować pojazd, który spełnia standardy komfortu i bezpieczeństwa pasażerów, w tym maksymalne przyspieszenie i prędkość przyspieszania.

## 1. Geneza zastosowania systemów Informatycznych sterowania i zarządzania ruchem PRT

Określenie *Personal Rapid Transit* (PRT) oznaczające szybki transport osób odnosi się do systemu, który może być uznawany za zautomatyzowany system taksówkarski [11]. Koncepcja systemu PRT sięga kilkudziesięciu lat, ale do ostatniej dekady istniało wiele nierozwiązanych problemów, takich jak: bezpieczne osiągnięcie odpowiednich zdolności przewozowych w małych pojazdach, zarządzanie ruchem pojazdów w dużych sieciach, niezawodność, estetyka prowadnicy i koszt systemu. Rozwiązania tych i związanych z nimi problemów zostały zapoczątkowane już w roku 1968, w prowadzonym przez firmę The Aerospace Corporation. W systemie tym podróżny jest przewożony bez przerwy i bez przejścia ze stacji początkowej do miejsca przeznaczenia. PRT to system energooszczędny i zazwyczaj elektryczny. PRT ma wyższą średnią prędkość niż samochód [9]. Trzej najwięksi producenci systemu PRT to 2getthere (Rys. 1.), ULTra PRT (Rys. 2.) i Vectus (Rys. 3.). 2getthere rozbudował system w Masdar City w Abu Dhabi, w którym długość prowadnic wynosi 11,3km, łączących pięć stacji, obsługiwanych przez 13 pojazdów. System ten dowozi pasażerów do stacji metra.



Rys. 1. PRT firmy 2getthere w Centrum Masdar City w Abu Dhabi [23]

System ULTRA PRT (Rys. 2.) stosowany jest na lotnisku w Londynie Heathrow. Jego sieć wynosi 13 km, łącząc trzy stacje obsługiwane przez 21 pojazdów. Systemy 2getthere i ULTRA PRT działają od końca 2010 roku. System Vectus działa od 2013 roku w Suncheon Bay w Korei Południowej (Rys. 3.).



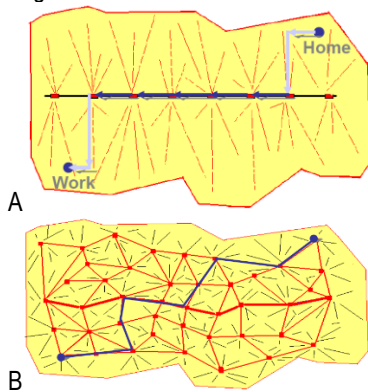
Rys. 2. PRT firmy ULTRA na lotnisku Heathrow [21]

System wdrożony w Korei posiadał długość 6 kilometrów, przy czym był obsługiwany przez 40 pojazdów. Dodatkowo, istnieje kilka mniejszych firm, które pracują nad koncepcjami PRT. Po dziesięcioleciach błędnych interpretacji możliwości PRT, systemy operacyjne PRT wywołały współcześnie nowe zainteresowanie.



Rys. 3. PRT firmy Vectus w Korei Południowej [22]

Warto również rozważyć jedną odmianę usługi PRT. Ta odmiana pozwoliłaby na to, aby dwóch lub więcej pasażerów wchodzących na pokład tego samego pojazdu wyznaczało różne stacje docelowe, pod warunkiem, że są one ulokowane w tym samym kierunku. Wówczas pojazd PRT przejedzie bezpośrednio do najbliższego miejsca przeznaczenia, a następnie przejdzie do innych. PRT to systemem transportu dostosowany zazwyczaj do jednorazowego przewozu od trzech do sześciu pasażerów, pojazdów poruszających się automatycznie na wyłącznych prowadnicach, oddzielonych od ruchu ulicznego i dla pieszych. Podróżnikowi i jego towarzyszom dedykuje się prywatny pojazd, którego nie dzieliliby z innymi. Jakość usługi w PRT powinna być porównywalna z jakością samochodu i zdecydowanie lepsza niż w konwencjonalnych trybach tranzytu publicznego.



Rys. 4. Koncepcja sieci połączeń PRT (B) na tle sieci współczesnej komunikacji miejskiej [13]

Podczas szczytowych godzin ruchu najczęstszym użytkownikiem PRT jest, prawdopodobnie wyjazd do domu i z pracy do domu. O popularności systemu PRT będą decydować deficyty aktualnie stosowanych systemów komunikacji miejskiej.

Tab. 1. Podejście do polityki transportowej [6]

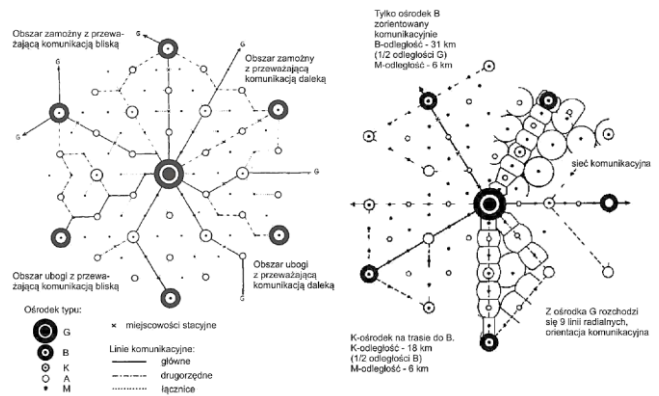
Czynniki	Podejście konwencjonalne	PRT
Odbiorcy	Grupy	Pasażerowie indywidualni
Kluczowy aspekt planowania usług transportowych	Inżynieria transportu	Zrównoważenie transportu
Cel transportu	Mobilność	Dostępność
Koncentracja ruchu (priorytet)	Liniowa	Dopasowana do preferencji podróżnego
Znaczenie ulic	Ulica jest korytarzem ruchu	Ulica jest przestrzenią
Kluczowe znaczenie dla projektowania ruchu	Potrzeby transportowe	Wzjęcie rozwoju osiedli, dzielnic, i miast
Zakres planowania	Jednolity program transportowy	Uwzględnianie wielu scenariuszy w transporcie
Priorytet rozwojowy	Przyspieszanie ruchu	Ograniczanie ruchu kołowego

W przypadku komunikacji miejskiej sieć jest często niedostosowana do potrzeb pasażerów, pod względem jej lokalizacji, co przedstawiono na Rys. 4.. Na Rys. 4. można zauważyć, że sieć PRT posiada bardziej przestrzenny schemat, który odchodzi od liniowych

połączeń komunikacji tradycyjnej [13]. Wynika to z faktu, iż współczesna komunikacja miejska dostosowana jest do transportu grupowego, nie zaś do potrzeb indywidualnych. W Tab. 1. przeanalizowano największe różnice między transportem PRT, a współczesnym grupowym transportem miejskim.

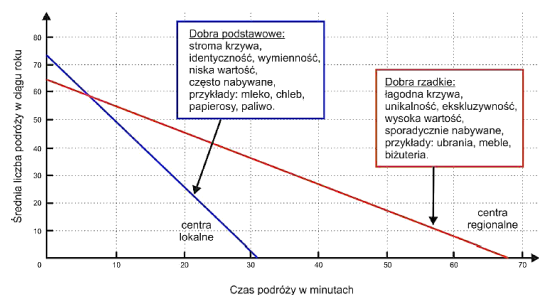
W zakresie polityki zrównoważonego rozwoju uwzględnia się zatem nie tylko cele ekonomiczne, ale ekologiczne i społeczne. W tym zakresie szczególnie znacznie ma m.in. poprawa bezpieczeństwa, redukcja zanieczyszczeń powietrza, zagwarantowanie dostępu do transportu indywidualnego [6]. Uwzględnienie tych czynników powinno mieć miejsce w tym samym czasie, przy czym przy różnym nacisku. Należy szukać tzw. „złotego środka” między interesami społecznymi pasażerów, a aspektami ekonomicznymi i ekologicznymi [19].

Mobilność transportowa struktur przestrzennych i ich mieszkańców powinna być analizowana łącznie, gdyż kwestie te są ze sobą nierozzerwalne [12]. Wynika to z dążenia do ciągłej poprawy dostępności transportowej dla obszarów aglomeracyjnych, przy analizowaniu zmian demograficznych. Związek pomiędzy rozwojem sieci osadniczej i połączeniami komunikacyjnymi pomiędzy poszczególnymi jej elementami został zaakcentowany w sposób silny w teorii ośrodków centralnych [20]. Współcześnie sieci ośrodków centralnych składają się z różnych obszarów o różnym zakresie oddziaływania, a o ich randze świadczy liczba oferowanych dóbr. (Rys. 5.).



Rys. 5. Sieci osadnicze ośrodków centralnych [4]

Na Rys. 5. przedstawiono układ ośrodków rozwinięty wg zasady rynku (pierwszy od lewej) oraz wg. zasady komunikacji (Rysunek po prawej stronie) [4]. W teorii ośrodków centralnych dobra o charakterze rzadkim (dobra wyższego rzędu) są ulokowane w ośrodkach o wyższej randze, natomiast dobra podstawowe są ulokowane w każdym ośrodku, przez co są łatwo dostępne. Dobra ekskluzywne zlokalizowane są przy tym w dużej odległości od siebie i potencjalnych odbiorców, a powszechne w bliskim sąsiedztwie, co warunkuje proces transportu [8].



Rys. 6. Motywacja do odbywania podróży do ośrodków o różnym stopniu centralności [8]

Problematyka sieci komunikacji została zatem sprowadzona do dwóch ujęć. W pierwszym kluczowe znaczenie ma ujęcie rynkowe. Ten aspekt decyduje, że linie komunikacyjne zostają odsunięte od wielu rodzajów ośrodków centralnych. W ujęciu drugim przewagę nad rynkiem uzyskuje zasada optymalizacji komunikacji. Według tej zasady ośrodki centralne różnych rodzajów lokalizowane są głównie wzdłuż głównych linii transportowych, tworząc „miejsca etapowe” [6].

Systemy PRT są częścią szerszego systemu *Automated Guideway Transit* (AGT) – „automatyczna szyna-prowadnica”. Definicje AGT i PRT zostały przyjęte z końcem lat 60 XX w. przez Departament Transportu USA. AGT to system, który jest definiowany jako dowolny system tranzytowy, który ma całkowicie zautomatyzowane pojazdy na stałych prowadnicach. Prowadzenie może być pod ziemią, nad ziemią, ale w każdym przypadku powinien być oddzielony od ruchu drogowego i pieszego.

W niektórych częściach miast linie podwyższone mogą być nie do przyjęcia, co wymaga, aby linie PRT znajdowały się pod ziemią. Z kolei ze względu na koszty liczba linii i stacji będzie ograniczona. W rezultacie może być konieczne ograniczenie liczby pojazdów wchodzących do takich stacji metra, aby wykluczyć prawdziwą usługę PRT i wymagać pewnego obowiązkowego podziału pojazdów.

Pojazdy mogą być obsługiwane jako pojedyncze jednostki lub jako pociągi. Wyróżnia się trzy główne kategorie systemów AGT:

- Pętla tranzytowa, z ang. *Shuttle-Loop Transit* (SLT);
- Szybki transport grupowy, z ang. *Group Rapid Transit* (GRT);
- Szybki transport osobowy (PRT).

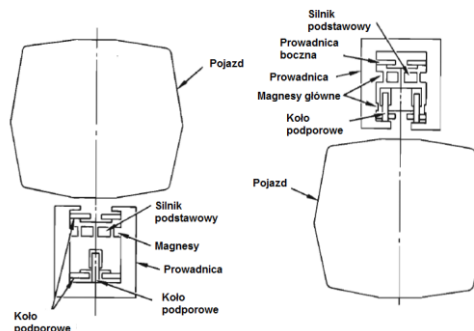
Niestety w definicji tych podkategorii wciąż nie ma zbyt wielu standardów, ani też definicji, które jednoznacznie obejmują całe spektrum systemów AGT. Niemniej jednak, definicje są użyteczne w zamówieniu usług AGT od najbardziej tradycyjnych usług transportu masowego (SLT) do najbardziej zindywidualizowanych form transportu (PRT). Mogą wystąpić przy tym przypadki, gdy będą oferowane usługi hybrydowe PRT/GRT.

Alternatywnym środkiem do realizacji podziału pojazdu jest posiadanie w każdej ze stacji „hubów” przesiadkowych między transportem PRT i transportem zbiorowym. Na przykład jeśli podróżujący jedzie do jakiegokolwiek miejsca przeznaczenia nie znajdującego się w centrum miasta, powinien wybierać pojazd PRT z lokalnej stacji mieszkalnej bezpośrednio do miejsca przeznaczenia. Jeśli jego miejsce docelowe znajduje się w centrum, to powinien wybierać pojazd PRT transportujący do najbliższej stacji „transferowej” (huba), na której przesiądzie się w komunikację zbiorową, którą będzie podróżować bez przerwy do stacji docelowej w centrum. Podobnie, wracając pasażer weźmie ze sobą pojazd wspólny do stacji transferowej, w której przeniósł się do pojazdu PRT. Współużytkowany pojazd może być identyczny z pojazdem PRT, na przykład można go dzielić z sześcioma pasażerami, lub może to być dwa lub więcej takich pojazdów połączonych ze sobą, tak by był zgodny z prowadnicami PRT i system kontroli. Stacja transferowa może wymagać rozgałęzień, aby oddzielić pojazdy typu PRT od pojazdów używanych do wspólnego użytku [11].

Reasumując, pojazdy PRT przeznaczone są do prywatnego używania. Typowe modele pojazdów mają maksymalną wydajność od trzech do sześciu pasażerów, umieszczanych na miejscach siedzących. Stacje PRT tworzą sieć, która zazwyczaj obejmuje rozległe rozgałęzienia. Pojazdy są przełączane z linii do linii i przewożą pasażerów ze stacji początkowej do ich stacji docelowej bez pośrednich przystanków.

## 2. Układy mechaniczne i ergonomiczne pojazdów PRT

Aby uniknąć nieefektywnego systemu opartego na sieciach szerokich i płaskich dróg, które zazwyczaj są wykorzystywane do obsługi standardowych pojazdów czterokołowych, firma Aerospace studiowała stosunkowo wąskie typy jednoszynowe, które wykorzystują koncepcję zawieszenia lub zawieszenia podwozia (Rys. 7.).

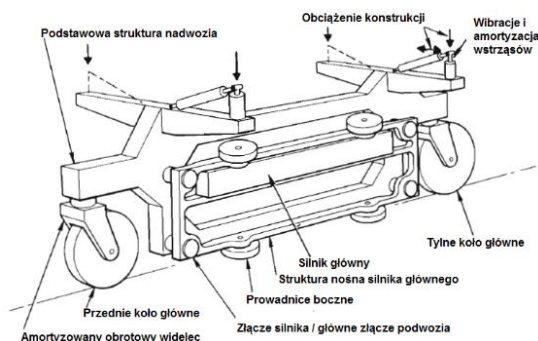


Rys. 7. Koncepcje PRT typu jednotorowego firmy Aerospace (od lewej: z jednym kołem podporowym i dwoma kołami podporowymi) [7]

Każda z tych konstrukcji wykorzystuje smukłą i zwartą belkę w kształcie litery V w celu zminimalizowania wpływu wizualnego i umożliwienia efektywnego wykorzystania materiału konstrukcyjnego. Ponieważ zawieszenie podwozia wykorzystuje belkę o kształcie odwróconej litery V, ma tę zaletę, że łatwiej je chronić przed osadzeniem się śniegu i lodu. Ma jednak pewne wewnętrzne wady. W przypadku, uregulowania ruchu ulicznego prowadnice muszą być na poziomie min. 1,8m większym niż belka nadrzędnej zawieszania. Wymagałoby to, aby słupy podpierające miały co najmniej 3m, ponieważ słupy dla konstrukcji podpodłogowej muszą być przymocowane do górnej części belki. Natomiast w nadrzędnym kształcie belka jest podparta od dołu. Ponadto wspornik belki dla podwieszenia podwozia musi być wspierać konstrukcję, co dodatkowo zwiększa grubość słupa. Dodatkowa wysokość i grubość słupów powodują wyższe koszty [7].

Konstrukcja podstawy zawieszenia (Rys. 8.) uwzględniała interakcję geometrii prowadnicy. Zawiera pionowe i boczne koła podporowe oraz urządzenia izolujące wibracje. Konstrukcja jest napędzana silnikiem i magnesami na prowadnicach.

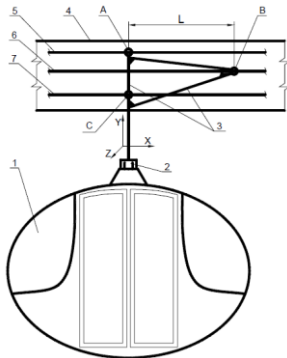
Podparcie pionowe pojazdu uzyskuje się za pomocą dwóch tandemowych kół głównych. Koła główne montowane są na „widelcowych” obrotowych amortyzatorach, które umożliwiają ruch przez przełączniki i zakrzywione sekcje prowadnicy. Koła te są mocowane do głównej struktury podwozia, aby umożliwić ściśle wyrównanie pionowe podwozia z magnesami prowadnic.



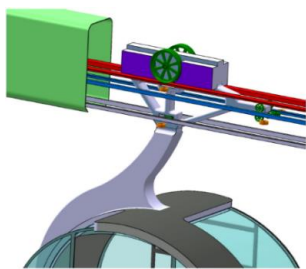
Rys. 8. Koncepcja zawieszenia pojazdu PRT [7]

W konstrukcji tej wibracje pionowe byłyby minimalne ze względu na stosunkowo gładką powierzchnię prowadnicy, a wszelkie ruchy pionowe wywołane przez złącza prowadnic są złagodzone przez amortyzatory wibracyjne i konstrukcję amortyzującą. Wspornik

boczny i prowadnica są wyposażone w osiem kół bocznych, cztery przymocowane do każdej z dwóch głównych struktur silnika. Te zestawy kół zapewniają boczne prowadzenie i utrzymanie pierwotnej szczeliny powietrznej oraz stabilność wywracania. Podstawowe struktury silnika są przymocowane do podwozia za pomocą sprężyn i amortyzatorów. Schemat rozwiązania konstrukcyjnego systemu pojazdów i schemat zamocowania kabiny PRT do układu jezdnego przedstawiono na Rys. 9.. Układ ten zaprojektowano w Polsce w systemie CAD (Rys. 10).

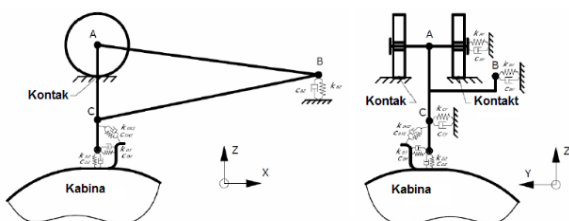


Rys. 9. Rozwiązania konstrukcyjne systemu pojazdów i schemat zamocowania kabiny PRT do układu jezdnego [2]



Rys. 10. Schemat pojazdu PRT [2]

Pojazd składa się z kabiny (1) zawieszanej przez urządzenie do amortyzowania wstrząsów (2) do wózka (3) przemieszczającego się wzdłuż jednodrogowej prowadnicy (4), w której znajduje się system nieruchomych prowadnic (5, 6, 7). Układ napędowy pojazdu zawiera trzypunktowe prowadnice A, B, C, przy czym punkt B znajduje się w odległości L od linii geometrycznej łączącej A i C w kierunku osi OX prezentowanego układu współrzędnych. Wartość L jest stała i mieści się w zakresie 0,1-5m, w zależności od charakterystyki geometrycznej kabiny pojazdu. Współzależna pozycja punktów A, B, C, które nie poruszają się względem siebie, zależy od geometrii układu jezdnego 3. W celu opisanego funkcjonowania systemu bieżącego wprowadzono lokalny układ współrzędnych LCS w postaci przedstawionej Na Rys. 11. poruszają się one razem z systemem prowadzącym, którego oś X wskazuje kierunek ruchu, a oś Y jest pionowa. Konstrukcja punktów A, B, C jest symetryczna względem płaszczyzny XY.



Rys. 11. Model pojazdu PRT ze sztywnym torem [2]

Model układu jezdnego obejmuje pomysł pojazdu jednoosiowego oraz fakt, że pojazd jeździ na jednej linii gąsienicy umieszczonej

w środku, a dolna linia toru kontroluje kąt pochylenia pojazdu. Podstawowe podparcia są umieszczone w punkcie A, gdzie znajdują się dodatkowo boczne kółka prowadzące. Punkt B odpowiada za kierownicę, a punkt C kontroluje kąt nachylenia. Nominalny model konstrukcyjny został opracowany zgodnie z rysunkiem 2.1. Położenie i orientacja modelu względem układu bezwładności OXYZ połączonego z bazą, gdzie oś X kierowana jest wzdłuż prowadnicy, oś Z skierowana jest do góry, a oś Y uzupełnia system osi w przypadku układu współrzędnych praworęcznych [2].

W przypadku kabin pojazdu należy wskazać na dużą ich różnorodność, która wynika z ich przeznaczenia, tzn. czy są dostosowane do przewożenia studentów w kampusie w Virginii, czy też bogatych turystów w Abu Dhabi, bądź pasażerów na lotnisku Heathrow. W efekcie kabiny pojazdów PRT charakteryzuje dużą różnorodność, podobnie jak kabiny samochodów, które występują w różnych klasach. Jednocześnie analizując PRT należy wskazać na różnice w konstrukcjach testowych (Rys. 12., Rys. 13.).

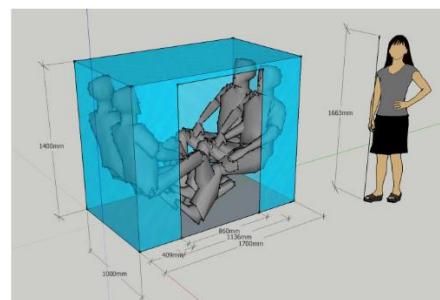


Rys. 12. Testowy PRT JPODS [21]



Rys. 13. Pojazdy PRT używane w Abu Dhabi [24]

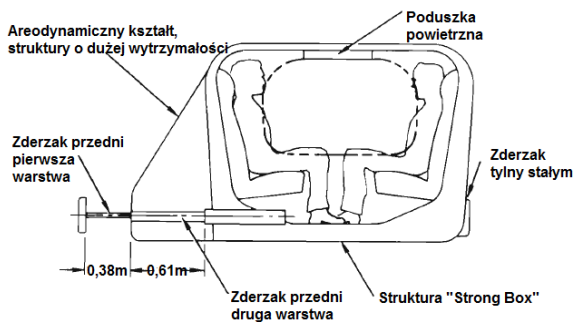
Większość kabin PRT mają zapewnić przewóz 4 osobom, siedzących w dwóch rzędach twarzą do siebie. Szacuje się, że taka kabina powinna mieć wewnątrz 1,4m wysokości i 1,7m długości. Przestrzeń wewnętrzna powinna mieć minimum szerokość na poziomie 1m (Rys. 14.).



Rys. 14. Ergonomia kabiny PRT [26]

W celu zilustrowania potencjalnych możliwości działania w przypadku awarii, dla pojazdów PRT, należy wziąć pod uwagę koncepcję projektu przedstawioną na Rys. 15., który przedstawia pojazd zawierający następujące cechy [7]:

- Konstrukcyjnie sztywny przedział pasażerski,
- Poduszki powietrzne pasażera,
- Montowane do przodu napinacze dalekiego zasięgu,
- Sztywny tylny panel zderzaka przymocowany do konstrukcji przedziału pasażera.



**Rys. 15.** Elementy kabiny pojazdu PRT zapewniające bezpieczeństwo [7].

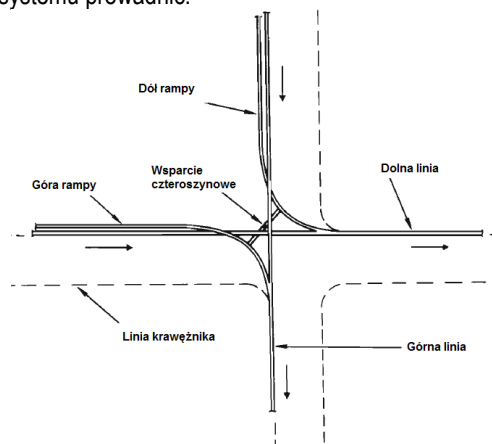
Kiedy jeden pojazd jest z tyłu, jest dobrze chroniony przez ścisłość przedniego zderzaka na uderzającym pojeździe, jak gdyby miał własny tylny zderzak ściśliwy [7].

Kontrola synchroniczna systemu PRT opiera się na koncepcji ruchomej „szczeliny”, która jest przestrzenią o określonej długości poruszającej się wzdłuż prowadnicy. Czasami „szczelina” jest określana jako „ruchomy blok”. Szczelina albo jest pusta lub jest zajęta przez środek. W punkcie łączenia szczeliny na dwóch połączeniach są tak zsynchronizowane, że dokładnie pokrywają się z połączoną linią. Szczeliny mogą się rozciągać w czasie jazdy, a w czasie hamowania się zmniejszają. Aby to zrozumieć, rozważyć należy ciąg pojazdów PRT ustawionych w sąsiednich szczelinach 4,6m i poruszających się z prędkością 9, m/s. Kiedy pojazdy przechodzą przez określony punkt zaczynają przyspieszyć do prędkości 18,3m/s. Po osiągnięciu tej prędkości nadal mają prześwit 0,5s, ale teraz szczelina otaczająca każdego z nich ma długość 9,1m. Jest to pożyteczna koncepcja wyjaśniająca dopuszczalne lokalizacje pojazdów poruszających się w systemie PRT. Podłużnym problemem kontrolnym jest utrzymanie każdego pojazdu w jego szczelinach lub, co jest równoważne, w jego punkcie. Z tego powodu takie podłużne systemy sterowania czasem nazywane są „punktowymi zwoznicami”, chociaż termin „punktory” również obejmowałby następujące punkty nie równomiernie rozmieszczone [7].

Zasadniczą ideą „synchronicznej kontroli” jest stworzenie systemu rezerwacji pod kontrolą komputera centralnego, a nie umożliwienie pasażerowi odjazd od jego stacji początkowej, dopóki nie zostaną wcześniej potwierdzone rezerwacje na jego wyjazd. W systemie tym jeśli pasażer zażąda podróży, jego wniosek jest przesyłany do centralnego komputera. Tam jest podglądana trasa do stacji docelowej, a dokładny czas, mierzony od chwili wyjścia, przejścia przez wszystkie punkty łączenia na trasie i do bocznicy docelowej. Czasy te są bardzo precyzyjne z powodu synchronicznego ruchu szczelin. Oczekuje się, że czas wyjazdu jest na tyle dobrze przygotowany, aby zapewnić pasażerom, że w tym czasie wejdą na pokład. W oparciu o przewidywaną godzinę wyjazdu określa się czas przybycia do stacji docelowej. Jeśli w wyniku uprzednio potwierdzonych rezerwacji stacja docelowa jest „zarezerwowana”, proces będzie powtarzany inaczej lub z nowym, późniejszym, postulowanym czasem odjazdu. Gdy stacja docelowa zostanie znaleziona, następnym krokiem jest sprawdzenie dostępności gniazd na każdym łączu trasy. W tym miejscu zdefiniowano „link” oznaczający sekcję prowadnicy z jednego punktu scalonego do następnego. Dostępność slotów jest potwierdzona przez sprawdzenie tabeli rezerwacji miejsc. Nie wystarczy potwierdzić, że gniazdo jest dostępne, gdy pojazd wjeżdża na określoną linię, ponieważ ta sama szczelina może zostać zarezerwowana dla innego pojazdu, który będzie łączony w szczelinę, gdy przechodzi on na skrzyżowanie w dół lub gdy przechodzi punkt scalenia z bocznicy ze stacji. Dlatego też po drodze trzeba zarezerwować szczelinę. Jeśli szczeliny nie są dostępne, postuluje się nowy, późniejszy czas

odjazdu, i cały proces jest powtarzany, w tym sprawdzanie stacji docelowej i dostępności slotów w trasie [3].

Typowe dwubiegowe, dwustronne przecięcia prowadnicy zilustrowano rzutem na Rys. 16.. Stanowi ono jeden z najtrudniejszych problemów konstrukcyjnych i estetycznych stojących przed projektantem systemu prowadnic.



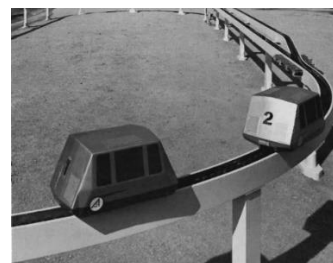
**Rys. 16.** Przecięcie ramp PRT z drogą w Los Angeles Montage Layout [7]

Powyższy rzut wymaga dostarczenia wsparcia dla czterech ciągów prowadnic w taki sposób, aby zminimalizować wpływ na ruch uliczny. Badanie różnych koncepcji, w tym indywidualnych słupów kolumnowych i wielowiązkowych kabli podwieszanych, doprowadziło do najczęstszego wybierania konstrukcji nośnej kratownic.

W latach 1971-1972 firma Aerospace Corporation skonstruowała i wdrożyła, jako pierwsza, skalowany model fizyczny PRT, aby dalej zbadać cechy zintegrowanej koncepcji napędowej, sterowania i przełączania. Szczegółowymi celami skalowanego modelu były:

- wykazanie działania impulsu;
- demonstrowanie i testowanie działania podsystemu sterowania ruchem pojazdów;
- sprawdzanie wykonalności kilku technik transmisji poleceń;
- weryfikowanie pojęcia przełączania elektromagnetycznego;
- uzyskanie danych przydatnych do projektowania pełnowymiarowych podsystemów PRT.

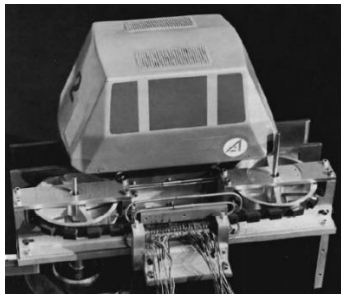
Skalowany model składał się z owalnej prowadnicy o wymiarach 14m na 4,3m. Obsługiwany był za pomocą pojedynczych przełączników bocznych i elektromagnetycznych. Trzy skalowane pojazdy typu PRT zawierały dwustronne impulsowe silniki liniowe i pokładowy system sterowania i z powodzeniem były uruchomione na prowadnicy.



**Rys. 17.** Test pierwszego systemu PRT firmy Aerospace Corporation z roku 1972 [7]

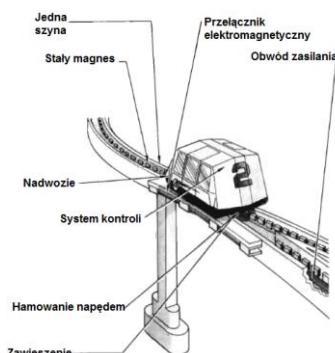
Prowadnica została tak zwymiarowana, aby umożliwić demonstrację pracy ciągłej, poślizgniętej i wykonywanie manewrów. Zainstalowano w układzie gniazda łączące, przełączające i awaryjne. Nominalna prędkość działania dla pojazdów o zmiennej wielkości wynosiła 0,91m/s, co odpowiada prędkościom w pełnym zakresie

9,1m/s. Wszystkie kluczowe elementy podsystemu napędowego, takie jak magnesy prowadnicy, pierwotny kształt i wymiary silnika, oraz konfiguracja i rozmiar szczeliny głównej zostały skalowane do 1/10 pełnego rozmiaru.



**Rys. 18.** Pojazd PRT w skali 1:10 systemu PRT firmy Aerospace Corporation z roku 1972 [7]

Instalacja prowadziła na zewnątrz i była połączona z pomieszczeniem kontrolnym w podziemnym kanale. W sali kontrolnej znajdował się system zarządzający. Zawierał on zasilacze i panel sterowania oraz sekwenery taśmowe do nakazania ruchu poszczególnym pojazdom. Podłączono obwody zasilania i sterowania. Do przewodów montowanych po obu stronach prowadnicy zastosowano połączenie z pojazdami za pośrednictwem styków ślizgowych. Pojazdy modelowe zostały skonfigurowane do przyjmowania poleceń z konsoli w drodze do wykonania około 12 profili manewrowych, przy wykorzystaniu tylko pokładowego systemu sterowania służącego weryfikacji pozycji. Do projektowania elementów modelu wykorzystano zarówno symulację komputerową, jak i mechaniczne symulacje dynamiczne. Podsystem sterowania pojazdem został symulowany na hybrydowym komputerze cyfrowym w celu sprawdzenia projektu obliczania błędów i układów logicznych. Do generowania symulowanych impulsów detektora Halla wykorzystano komponenty logiczne w komputerze, sterując generowaniem błędów i czasem manewrów. Dynamika pojazdów i układy kompensacji serwomechanizmu silnika również symulowano elementami analogowymi. Technika ta okazała się użyteczna w weryfikacji wyboru wzmocnień serwomechanizmu i badaniu przeciążeń podczas uruchamiania i manewrowania.



**Rys. 19.** Schemat systemu PRT firmy Aerospace Corporation z roku 1972 [7]

Układ napędowy dla modelu skalowanego był zgodny z konfiguracją ustaloną przez analizę silnika o pełnym rozmiarze. Podstawowy silnik został zaprojektowany z rozszczepionym rdzeniem zawierającym łącznie 48 szczelin.

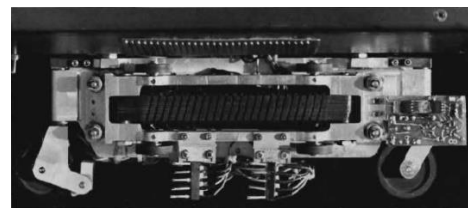
Na pętli PRT, gdy napotkano przeszkodę, przełącznik ciśnienia wykazywał pełną siłę hamowania ze wszystkich pojazdów na prowadnicy. Ponieważ przewidywano, że techniki mikrokomputerowe będą stosowane w pojazdach pełnoklasowych, zatem były one

również stosowane w modelowych pojazdach, system sterowania był oczywiście pełnowymiarowy i służył jako podstawa szeroko zakrojonych badań niezawodności. Skalowane pojazdy zawierały układy półprzewodnikowe w celu odbierania i dekodowania cyfrowych poleceń oraz przetwarzania i interpretowania poleceń sterowania napędem. Transmitter danych poleceń został wdrożony na dwa sposoby [7]:

- sygnały modulowane częstotliwością (FM) w zakresie 300-600 kHz były, a dane wprowadzano do szczotek kontaktowych,
- dane były transmitowane przez modulowany amplitudowo fali (AM) na częstotliwościach radiowych (25-30 MHz) do odbiorników samochodowych.

Dwanaście pojedynczych komend samochodowych było przechowywanych w każdym samochodzie i zostały wykonane po otrzymaniu odpowiedniego sygnału dowodzenia z konsoli.

Otwarta prowadnica jednokierunkowa kanału otwartego została zbudowana na wysokości około 0,5m, co odpowiada 1/10 normalnej wysokości instalacji miejskiej. Ściany zewnętrzne i spód wykonano z aluminium. Wewnętrzne ściany były wykonane z żelaza, aby zapewnić dobrą ścieżkę dla obwodu magnetycznego. Magnesy trwałe, wykonane z ferrytu strontowego, związane były z wewnętrzną ścianą żelaza w starannie oznakowanych miejscach w przedziałach 5cm. W przełącznikach w ścianach prowadnicy umieszczono szczeliny, aby umożliwić montaż czołowych biegunów elektromagnesu. Na każdym pionowym kołnierzu umieszczono pięć przewodów do przenoszenia mocy i informacji do pojazdów poprzez styki ślizgowe. Zawieszenie pojazdu zostało zaprojektowane w taki sposób, aby zapewnić stabilność pojazdu i boczne prowadzenie, a także utrzymywać nominalną szczelinę powietrzną o średnicy 8 cm. Wszystkie pionowe obciążenia były przenoszone przez dwa główne koła podporowe, a obciążenia boczne na podstawie rdzenia dzielonego zostały uchwycone przez cztery boczne koła po obu stronach (Rys. 20.). Zawieszenie zostało zaprojektowane tak, aby umożliwić zmianę odchylenia magnetycznie atrakcyjnych bocznych obciążeń na boczne koła.



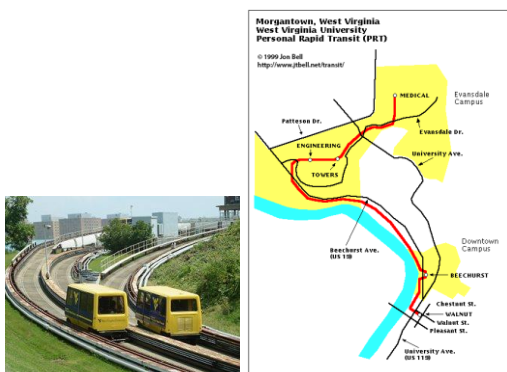
**Rys. 20.** Zawieszenie pojazdu PRT w skali 1:10 systemu firmy Aerospace Corporation z roku 1972 [7]

W modelu wprowadzono dwa stanowiska przełączników, przy których zainstalowano przełączniki elektromagnetyczne, jak pokazano na rysunku. Magnesy trwałe w tych miejscach zostały zastąpione żelaznymi i żeliwnymi kawałkami nawijanymi cewkami zawierającymi po 2300 obrotów. Kawałki biegunowe wprowadzono przez szczeliny frezowane w ścianie bocznej prowadnicy. Polecenie przełącznika pobudziło źródło światła podczerwonego w pojeździe, a światło było wyczuwalne przez odbiornik zamocowany w prowadnicy, aby uruchomić tryb przełączania. W tym trybie grupa ośmiu biegunów została odcięta na odcinku prostym, a przeciwny zestaw ośmiu biegunów na odcinku rozbieżnym był pod napięciem. Ten stan utrzymywał się na wystarczająco długo, aby spowodować, że pojazd skręcający się odchylił. Proces został następnie odwrócony tak, że prosta część została ponownie pod napięciem, zanim zbliżył się pojazd.



**Rys. 21.** Instalacja przełączników elektromagnetycznych systemu PRT firmy Aerospace Corporation z roku 1972 [7]

Testy systemu PRT w USA już z początkiem lat 70 XX w. pozwoliły na doprecyzowanie szczegółów konstrukcyjnych w obwodach zasilania i sterowania przewodów, elektrycznych przetworników elektrycznych, położenia czujnika przełączania elektromagnetycznego i ustawień zawieszania pojazdu. Zweryfikowano także zapotrzebowanie na moc pojazdu i ogólne czynności motoryczne oraz przeprowadzono pomyślnie testy systemu przesyłania danych polecenia. Wraz z rozwojem pełnego wyposażenia trzech pojazdów z kontrolą pętli zamkniętych przeprowadzono pełną serię typowych operacji PRT. Prace prowadzone w latach 70 XX w. stały się podstawą dla rozwoju PRT. Przykładem są nie tylko systemy symulacyjne ale gotowe systemy PRT (Rys. 22.), który skonstruowano na Uniwersytecie Zachodnim w Wirginii [20].



**Rys. 22.** Pojazdy i sieć systemu PRT skonstruowanego w latach 1970-1979 [25]

System ten działa od prawie 40 lat i jest podstawowym trybem obsługi studentów, wykładowców i pracowników na terenie kampusu uniwersyteckiego [20].

Konkludując wskazuje się, że w wyniku pierwotnych badań symulacyjnych różnych rozwiązań konstrukcyjnych wózka PRT powstało rozwiązanie, w którym system napędowy składa się z wózka i szyn, bądź szyny prowadzącej. Oprócz tego, boczne koła prowadzące są stosowane w wyłącznikach pasywnych. Kierunek ruchu przez złącze jest realizowany za pomocą specjalnego mechanizmu włączonego do układu jezdny pojazdu. Dodatkowo aktualne modele pojazdów PRT są często zawieszane pod bieżnią, a napęd pojazdu jest możliwy dzięki silnikowi.

### 3. Projekt systemu PRT

#### 3.1. OPTIMAL – system do wyznaczania stacji PRT

W prowadzonej przez autorów artykułu pracy projektowej wykorzystano system Circulator-CAD, który posłużył w wyznaczaniu stacji przesiadkowych PRT. Narzędzie to służy projektowaniu układów sieciowych dla systemów cyrkulacji dużych centrów aktywności, np. miast, w których bada się natężenie ruchu. Obsługuje on intuicyjny interfejs, dzięki któremu transy PRT można szybko i łatwo tworzyć, modyfikować i oceniać, przy projektowaniu kilku układów

sieciowych. Takie podejście umożliwia integrację rozpoznawania wzorców przestrzennych i intuicyjnych możliwości planisty przy pełnym wykorzystaniu mocy obliczeniowej i pamięci komputera. Typowy proces projektowania może obejmować generowanie kilku projektów tras, z których każdy odnosi się do poprzedniej trasy.

Wybór tego oprogramowania wynika z częstego jego stosowania przez badaczy amerykańskich zajmujących się tematyką PRT. Dlatego w pracy bardzo pomocne okazały się publikację, w których wykorzystywano OPTIMAL w projektowaniu tras PRT. Dotyczy to w szczególności wyników badań Jerry'ego B. Schneider'a [14-18].

W C-CAD OPTIMAL osąd planisty może być wykorzystany do oszacowania minimalnej liczby stacji, które najprawdopodobniej osiągną cele obsługi klientów systemu PRT. To oczywiście, że będzie to proces iteracyjny, którego długość i trudność zależą od umiejętności i dobrego szacowania planisty. System C-CAD OPTIMAL wykorzystano do przeprowadzenia heurystycznego wyszukiwania lokalizacji stacji (X), które będą jak najbliżej największych skupisk ludności. System PRT wykorzystuje algorytm wyszukiwania „stromego spadku”, a obliczanie zazwyczaj trwa zaledwie kilka minut. OPTIMAL „znajduje” zestaw miejsc, które są jak najbliżej rozproszonego popytu w centrum miasta. Następnie dokonuje się kalkulacji w celu określenia poziomu pokrycia, który udostępni ten zestaw stacji.

Program C-CAD został zaprojektowany do wykorzystania jako narzędzie planowania szkicu na wczesnym etapie planowania. Pozwala użytkownikowi na szybkie i łatwe opracowanie i ocenę szerokiej gamy opcji układu fizycznego i może być wykorzystany do oceny ogólnej wykonalności szerokiego spektrum koncepcji cyrkulacji na wstępnych etapach badania systemu.

#### 3.2. Założenia systemu centralnego sterowania

W podrozdziale scharakteryzowano projekt komputerowy PRT ukierunkowany na konsumenta tego systemu. Szczególną uwagę poświęca się określeniu liczby i lokalizacji stacji PRT, dzięki czemu uzyskuje się wysoki poziom zasięgu. Odbywa się to przez wyrażenie czasu chodzenia i oczekiwania, które napotkali klienci chodzący do i/lub ze stacji PRT. Opisany i zilustrowany komputerowo wspomagany proces projektowania, który prowadzi do identyfikacji zbioru lokalizacji stacji, które minimalizują wymagania przejazdów i oczekiwania na nierównomiernie rozproszoną populację. Stwierdzono, że korzystanie z podejścia zorientowanego na konsumentów daje projekt sieciowy, który zawiera wiele innych stacji, niż wskazują konwencjonalne metody planowania sieci PRT. To stwierdzenie sugeruje, że minimalizacja wielkości i kosztów elementów systemu PRT ma zasadnicze znaczenie, jeśli potencjalnym klientom zostanie zapewniony rentowny, wysoki poziom obsługi.

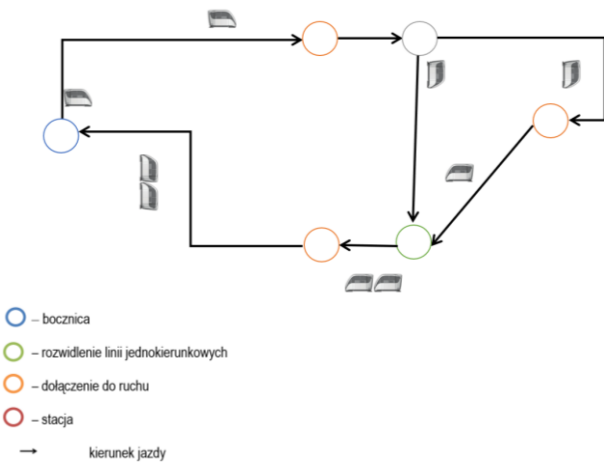
Do eksperymentów symulacyjnych potrzebny jest model sieci PRT. Model zawiera:

- topografie sieci (wykres przewodnic: węzły, linie, odległości, położenie na mapie miasta, rodzaje i parametry stacji i kondensatorów itp.,
- zestaw pojazdów (liczba pojazdów i ich parametry: maksymalna prędkość, przyspieszenie, hamowanie, odległość między pojazdami w ruchu,
- model zapotrzebowania na usługi PRT (rozkład czasu między przybyciem klientów, ich intensywność, czy strumień wejściowy jest zależny od pory dnia i topografii),
- model zachowania pasażerów, parametry kontroli pojazdów (utrzymanie algorytmu, utrzymywanie separacji, zasady pierwszeństwa przy łączeniach przyłączy, zachowanie pojazdu na stacji, zastosowania zwrotnic),
- Parametry zarządzania zespołem pojazdów, w tym zarządzanie pustymi pojazdami,

– Skorzystanie z usług podlega rejestracji.

W pełni zdefiniowany model symulacji jest zbiorem danych, określającym efekt działania symulatora podczas eksperymentów symulacyjnych. W celu zwiększenia niezawodności statystycznej zarejestrowanych danych należy powtórzyć eksperymenty symulacyjne dla dokładnie tego samego zestawu parametrów modelu, eksperyment powinien składać się z wielu powtórzeń. Aby zmierzyć zależność danego czynnika od wartości parametru, na przykład zależność czasu oczekiwania na wiele pojazdów w sieci, należy przeprowadzić szereg eksperymentów symulacyjnych, w których jeden parametr modelu zmienia się, podczas gdy inne są ustalone. Tak więc w trakcie doświadczeń symulator wykonuje znaczną liczbę serii symulacji, a zarówno planowanie doświadczeń, jak i technika ponownego zapisywania i przetwarzania ich wyników odgrywają bardzo ważną rolę. Projekt musi obejmować także bardziej ogólne badania symulacyjne, mające na celu wykrycie bardziej uniwersalnych zagrożeń dla jakości, np. zależność czasu oczekiwania od pasażera na parametry algorytmu ogólnego zarządzania pustymi pojazdami. W tych badaniach, aby zwiększyć reprezentatywność jakości aplikacji, zastosowano kilka uproszczonych modeli sieciowych, które odpowiadały hipotetycznemu, prawdopodobnie typowemu układowi hipotetycznej sieci PRT: sieci w tradycyjnym układzie z centrum i obwodami, ulic tworzących siatkę prostokątną, pole rozciągnięte liniowo itd.

Prace projektowe rozpoczęto od zdefiniowania dużej liczby możliwych i pożądaných lokalizacji stacji PRT, a następnie wykorzystuje algorytm wyszukiwania w celu znalezienia podzbioru tych miejsc, które będą jak najbliższe największych grup pasażerów. Wraz z wynikami komputera wizualne postrzeganie, intuicyjność i znajomość lokalnego planisty używane są także do lokalizowania stacji, które wymagają minimalnych czasów dojścia pasażerów. Na Rys. 23. przedstawiono rolę znaków odniesienia.



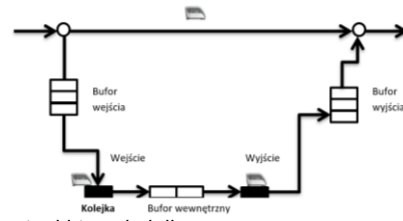
**Rys. 23.** Założenia dla systemu zarządzania ruchem PRT

Źródło: Opracowanie własne

Schemat prowadnicy PRT składa się z węzłów i linii. Węzły są bocznkami (kondensatorami), stacjami i przecięciami. Przecięcia łączą segmenty toru to rozwidlenie. Linie są jednokierunkowe. Ponieważ symulacja komputerowa jest procesem systematyzującym obsługę PRT, więc ruch pojazdów na segmentach toru musi zostać zdigitalizowany. W tym celu każda linia PRT jest dzielona na sektory. Liczba sektorów w każdym segmencie musi być liczbą całkowitą.

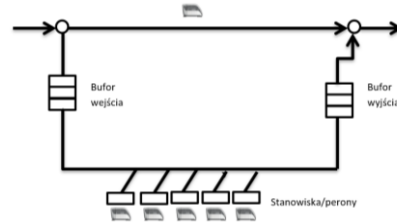
Stacja jest miejscem, w którym pasażerowie zaczynają i kończą swoje podróże. Funkcje stacji determinują występowanie pewnych elementów konstrukcji: kolejki pasażerskiej, miejsc parkingowych dla pojazdów oraz buforów wejściowych i wyjściowych. Głównymi

rodzajami przystanków są: przystanki kolejowe i peronowe, których funkcjonowanie przedstawiono na Rys. 24. oraz Rys. 25.



**Rys. 24.** Przystanki typu kolejowego

Źródło: Opracowanie własne



**Rys. 25.** Przystanki typu peronowego

Źródło: Opracowanie własne

Bocznice (kondensatory, garaże, hangary) są źródłem wejścia pojazdów do ruchu i miejscem przechowywania pojazdów, które obecnie nie planują wyjazdu. Kondensator jest stacją uproszczoną, w której nie ma kolejki pasażerskiej, nie ma miejsc wejścia na pokład i postoju. Symulator może być zbudowany bez kondensatorów, w tym przypadku stacje są źródłem pojazdów, wówczas nie ma więcej pojazdów, niż miejsc parkingowych na stacji. Zaletą tego podejścia polega na tym, że okres szykowania pojazdu jest dużo krótszy. Wadą jest brak możliwości sprawdzenia rzeczywistych algorytmów zarządzania, które muszą uwzględniać kondensatory. Pojazdy są jedynymi obiektami poruszającymi się po sieci. W modelu należy zdefiniować ogólne parametry dla całego zestawu pojazdów, takie jak:

- całkowita liczba pojazdów,
- maksymalna liczba pasażerów w pojeździe,
- maksymalna prędkość,
- dopuszczalne przyspieszenie i hamowanie,
- dopuszczalne spowolnienie, podczas hamowania ciernego (w sytuacjach awaryjnych),
- początkowe umieszczenie pojazdów w kondensatorach i/lub stacjach.

Projekt zakłada, że pojazdy są tylko jednego typu, chociaż w ogóle mogą mieć kilka typów, np. pojazdy zwykłe i awaryjne, większe i małe itd. Oprócz danych wspólnych dla wszystkich pojazdów, podczas symulacji są potrzebne struktury danych reprezentujące poszczególne pojazdy. W takiej strukturze dla pojedynczego pojazdu, oprócz jego identyfikatora (liczby), zachowywane są parametry ruchu, takie jak prędkość maksymalna, przyspieszenie i hamowanie, jego aktualny stan, np. pusty lub z pasażerami, podczas podróży, na torze itp. oraz informacje o bieżącej podróży:

- rodzaje grup pasażerów (np. podział na VIP pasażerów i pasażerów zwykłych),
- pochodzenie i miejsce przeznaczenia podróży,
- czas podróży.

Struktura systemu musi również przechowywać informacje o aktualnej pozycji pojazdu, potrzebnych do wdrożenia i utrzymania na torze oraz zasad pierwszeństwa na skrzyżowaniach.

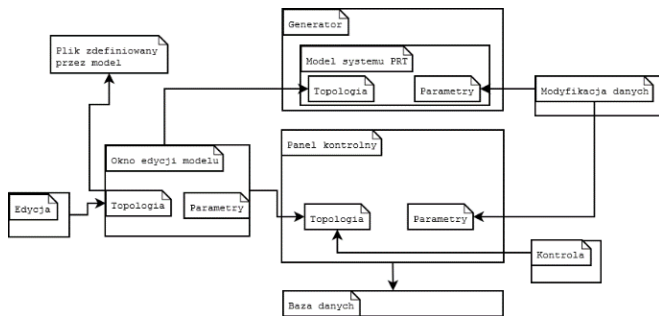
### 3.3. Koncentrator danych

Zadania środowiska symulacyjnego są następujące:

- Zdefiniuj, modyfikuj i edytuj model symulacji sieci PRT.



- Zdefiniuj parametry eksperymentu symulacyjnego (czas symulacji, czas rozgrzewania, numer replikacji, parametry rejestrwania: nazwy plików itp.).
- Wykonaj samą symulację, w połączeniu z rejestracją danych generowanych przez uruchomienie symulacji.
- Dwuwymiarowa animacja eksperymentu symulacyjnego (jest opcjonalna, może być włączana i wyłączana w dowolnym momencie na żądanie użytkownika).
- Przetwarzanie i edytowanie wyników.



Rys. 26. Założenia dla systemu PRT

Źródło: Opracowanie własne

System PRT integruje narzędzia programowe związane z zadaniami wymienionymi powyżej. Zwykle ma kilka trybów odpowiadających indywidualnym zadaniom, tryb edycji topografii modelu, definiowanie parametrów i tryb symulacji. Rytm trybu pracy systemu jest definiowany przez zdarzenia przypisywane obiektom PRT. Na szczeblu kierowniczym dotyczy to:

- wydarzeń dotyczących grup pasażerów: pojawienie się grupy pasażerów na stacji (z określeniem miejsca przeznaczenia), zajęcie pojazdu, rozpoczęcie i zakończenie podróży;
- wydarzenia dotyczące pojazdu, są to: zajęcie przez grupę pasażerów pojazdu, start i koniec podróży;
- rozpoczęcie podróży bez pasażerów; „Pusta” podróż powinna być zainicjowana przez system zarządzania siecią PRT.

Każde wydarzenie jest opracowane w celu obliczenia wszystkich konsekwencji zdarzenia, zarówno dla przedmiotów bezpośrednio związanych: pojazd i/lub grupa pasażerów, jak i innych obiektów w sieci PRT. Obliczenia są zakończone przy określaniu następnego zdarzenia ze znacznikiem czasu. Na każdej stacji znajduje się „generator pasażera”, który jest odpowiedzialny za tworzenie grup pasażerów. Wszystkie zaplanowane zdarzenia są umieszczane w strukturze zwanej buforem zdarzeń, w rosnącej kolejności według ich czasu zalogowania się do systemu. System w pętli s odbiera pierwsze zdarzenie z buforu, wykonuje, np. koniec trasy, a następnie realizuje wszystkie konsekwencje tego zdarzenia od nowa. Podczas tej procedury mogą powstać nowe zdarzenia.

Ponieważ pojazdy PRT są bezzałogowe, ich ruch nie podlega sztywnym rozkładom jazdy i jest całkowicie zautomatyzowany - algorytmy sterowania pojazdem są bardzo ważną częścią każdego projektu PRT. Prowadzenie pojazdu na torze musi również odbywać się zgodnie z poprzednim pojazdem, jeśli jest na tyle blisko, że może stworzyć niebezpieczną sytuację. Możliwe są dwie ogólne zasady zachowania. Pierwsza to zasada ostrożności: pojazd może poruszać się najwyżej z taką prędkością, co pozwala bezpiecznie zatrzymać się na torze pomiędzy bieżącą pozycją a aktualną pozycją poprzedniego pojazdu. Druga to optymalna reguła, pojazd może poruszać się z prędkością pozwalającą na zatrzymanie za pojazdem poprzedzającym, przy założeniu, że poprzedni pojazd zaczyna spowalniać jednocześnie. Optymalna reguła daje mniejszy margines bezpieczeństwa, mniej bezpieczeństwa w przypadku awarii pojazdu lub systemu sterowania, ale pozwala na znacznie większą pojem-

ność sieci, liczbę pojazdów, które mogą jednocześnie poruszać się w sieci. Przy modelowaniu zachowań w pojeździe takie dodatkowe zajęcia powinny być związane z wejściem na pokład grupy pasażerów, przy peronie/stacji, zajęcie miejsca w buforze wyjściowym itp.

Badania symulacyjne różnych algorytmów mogą być przeprowadzane na znacznie uproszczonych modelach symulacji. Sieć symulowana może składać się tylko z kilku segmentów toru, jednej lub dwóch stacji i kondensatora, dwóch lub trzech pojazdów, a model popytu i zachowania pasażerów mogą być bardzo uproszczone. Po opracowaniu poprawnego algorytmu koordynacji w przypadku dwóch lub trzech pojazdów, można go bezpiecznie zastosować w pełnym modelu. Badania symulacyjne różnych wariantów drugiej klasy algorytmów, to znaczy algorytmów zarządzania zestawem pojazdów, powinny być przeprowadzane w modelu pełnego sieci. Celem tych algorytmów jest zarządzanie zachowaniem całej dużej grupy pojazdów, które zapewniają osiągnięcie podstawowych funkcji transportowych PRT, takich jak wybór pojazdu dla grupy pasażerów, jak również optymalizacja. Na przykład zarządzanie pustymi pojazdami w celu zminimalizowania długości kolejki i czasu oczekiwania na stacjach. Zarząd musi wziąć pod uwagę stan pewnej części sieci, ale niekoniecznie całą sieć. Na przykład problemy, które wymagają rozwiązania dynamicznych algorytmów zarządzania, obejmują następujące pytania:

- Jaki pojazd ma optymalnie przyporządkować się do połączenia dla nowej grupy pasażerów, pojawiających się na stacji?
- Co z pojazdem, który właśnie został wydany?
- Jaka trasa na wykresie sieci będzie optymalna, aby wysłać pojazd (pusty lub pełny) od miejsca rozpoczęcia do przeznaczenia?
- Czy w trakcie podróży można zaktualizować trasę (zoptymalizowaną), na przykład w zależności od aktualnej gęstości ruchu i ewentualnego przecięcia w różnych punktach sieci (dynamiczne trasowanie)?

Ostatnie z wyżej wymienionych pytań wymaga dalszej współpracy, ponieważ wybór trasy jest jednym z podstawowych zadań algorytmów zarządzania systemem PRT. W najprostszym przypadku sieci można uznać za ukierunkowany wykres, w którym każdej linii jest przypisana długości, a jeden ze znanych algorytmów do obliczania najkrótszej ścieżki na wykresie może być użyty. Kierowany wykres sieci PRT powinien być silnie spójny, aby dotrzeć do każdego węzła z każdego innego węzła. W wielu sytuacjach można wyznaczyć dwie lub więcej alternatywnych tras. Trasa powinna być optymalnie wybrana z określonego punktu widzenia. Obliczona trasa jest identyfikowana przez węzły źródłowe i docelowe oraz sekwencję kolejnych przecięć „widełek” pomiędzy nimi. Wybór kierunku jazdy może odbywać się tylko w tych skrzyżowaniach. Najkorzystniejsza droga, z danego punktu widzenia, zawiera zestaw segmentów wybranych w taki sposób, że funkcja obiektywności liczona globalnie ma osiągnąć minimum dla wszystkich możliwych tras. Aby obliczyć wartość tej funkcji, zwykle do każdego segmentu przypisywana jest określona liczba, określana jako koszt. Wartość tej funkcji stanowi łączny koszt wszystkich segmentów na trasie. Najprostszym przypadkiem kosztu jest długość segmentu, ale może również składać się z wielu elementów, ważonych wagami, na przykład odległość, czy odwrotny czas podróży. Jeśli koszt segmentu zależy od stanu toru, na przykład wystąpienia zacięcia lub tymczasowej awarii segmentu, wówczas wartość funkcji celu może się różnić w czasie. Może być użyteczne ponowne obliczenie trasy podczas jazdy pojazdem, dynamiczne trasowanie. Należy zauważyć, że ponieważ wybór między dwiema ścieżkami może być tylko na krzyżowaniu, to nie ma sensu, aby ustawić drogę w miejscu, tuż przed zatorami. Należy zauważyć, że każda kalkulacja trasy może pogłębić całkowitą długość, jeśli konieczne jest np. obejście błędu, a

także skrócenia jej jeśli w międzyczasie ulepszono wcześniej odrzuconą trasę. Dlatego dynamiczne trasowanie jest formą optymalizacji czasu podróży, gdy zmieniają się warunki ruchu w systemie PRT. Dynamiczne trasowanie może być również używany do ponownej konfiguracji sieci

w przypadku awarii toru. Jeśli w wyniku awarii wykres działania systemu stanie się niespójny, m.in. przez sytuację, w której:

- pojazdy, które nie mogą dotrzeć do końca uszkodzonego segmentu;
- pojazdy, które nie mogą dotrzeć do swoich miejsc docelowych, muszą ustalić nowy cel, możliwie jak najbliżej poprzedniego celu topograficznego;
- inne pojazdy powinny ponownie obliczyć swoje trasy, ponieważ niektóre węzły na istniejących trasach mogą stać się nieosiągalne, nawet jeśli cel jest wciąż osiągalny.

Badania w projekcie pokazują, że możliwość samodzielnego sterowania parametrami algorytmów zarządzania pojazdami, w szczególności zarządzania pojazdami pustymi, ma bardzo istotny wpływ na wskaźniki skuteczności PRT.

W Systemie badana jest zależność zachowania sieci PRT w zależności od parametrów symulacji. Symulator powinien umożliwiać zmianę wartości wielu parametrów wejściowych związanych z:

- strukturą sieci (modyfikacją węzłów i krawędzi wykresu, ograniczeniami prędkości);
- strukturą stacji (typy stacji, liczba miejsc, wielkość buforów);
- dane wejściowe i zachowanie pasażerów (intensywność wprowadzania, rozkład wielkości grup, czasy rozruchu wsiadania i wysiadania);
- macierz pochodzenia początkowego;
- parametry ruchu pojazdu (przyspieszenie, hamowanie, ograniczenia prędkości, separacja);
- zasady pierwszeństwa przecięć „łączenia” i podczas wchodzenia do ruchu;
- trasowanie;
- koordynacja algorytmów i zarządzania pojazdem.

Środowisko symulacji powinno ułatwić organizację eksperymentów symulacyjnych. W szczególności ważnymi funkcjami są:

- zarządzanie plikami zawierającymi modele, parametry, wynikowe dane, meta-parametry (dotyczące samego symulatora, a nie modeli symulacji);
- definiowanie wykresu węzłów i segmentów w modelu wraz z parametrami tego wykresu (typy i pojemności stacji, długości segmentów, dzielenie na sektory itp.);
- w systemie PRT projektant może określić skalę modelu topograficznego i zastosować długości segmentów prosto z planu miasta;
- w systemie PRT powinna istnieć możliwość edytowania wykresu: skalowanie modelu, przenoszenie węzłów, zmianę parametrów, takich jak typy stacji, definiowanie kolorów elementów sieci;
- zmiana parametrów sieci, pasażerów na drogach, parametry zarządzania pojazdami itp., aby wygenerować wiele modeli na podstawie tego samego układu sieci (z różnymi wartościami parametrów ruchu itp.).

Dla ułatwienia definiowania wartości liczbowych parametrów użytkownik systemu PRT powinien dysponować wartościami domyślnymi, wówczas to on decyduje, czy należy używać wartości domyślnych, czy tylko dla poszczególnych elementów modelu, jak m.in. natężenia strumienia wejściowego dla wszystkich stacji, bądź dla stacji wybranych. Parametry struktury sieci są stałe w czasie pracy systemu PRT, ale pewna liczba parametrów, algorytmów ruchu, wejść i zarządzania, może zmieniać się podczas symulacji, odzwierciedlając szczególne sytuacje, np. zmienność natężenia

wejściowego i matryca ODM w różnych porach dnia itp. Po zakończeniu eksperymentu system przygotowuje w wyniku standardowych, najczęściej stosowanych parametrów wyjściowych, informujących o zachowaniu sieci, wyniki dotyczące:

- Stacji - średnia długość kolejki, średni czas oczekiwania, średnia liczba pojazdów stojących, itd.;
- Pojazdów - przeciętne czasy podróży, przeciętne trasy, kilometry pełnych i pustych tras, opóźnienia itd.

Poza średnimi wartościami, wynik symulacji może zawierać:

- raport wszystkich podróży, minimalny czas, rzeczywisty czas, opóźnienie, długość trasy, liczbę pasażerów;
- raport ze zdarzenia wybranego przez użytkownika systemu PRT.

Te szczegółowe raporty mogą być wykorzystane do zbudowania własnych, wykonanych procedur działania systemu PRT dla obliczania i edycji wyników symulacji jego działania.

#### 3.4. Analiza struktury obszarowej systemu PRT

Analiza systemu musi odbywać się w niewielkim odstępie czasowym, aby móc odzwierciedlić ciągły ruch pojazdów i uwzględniać interakcje między pojazdami tak dokładnie, jak jest to możliwe. Podstawową decyzją o mikrosymulacji jest metoda wyznaczenia początku etapu czasowego, a więc moment podjęcia decyzji w sprawie nowego stanu sieci. Rozwiązanie może być synchroniczne, gdy decyzje o zachowaniu pojazdów są podejmowane w tym samym czasie dla wszystkich z ustalonym czasem.

W ocenie systemu PRT symulowany czas powinien różnić się od czasu symulacji. Na przykład, jedna godzina symulacji, w czasie rzeczywistym uruchomienie obliczeń symulacji, może być poddawana symulacji sieci w ciągu jednego tygodnia (symulowany czas). Nie ma proporcji pomiędzy dwoma przepływami czasu. Symulowany czas przebiega wolniej lub szybciej, w zależności od tego, jak zdarzenia są badane w systemie PRT przez symulator. Jednak naturalnym i najlepszym rozwiązaniem jest przeprowadzenie oceny systemu z szybkością wyznaczoną przez pracę symulatora. Aby być bliżej symulacji gładkiej, symulator systemu PRT może:

- spowolnić symulację przez wstawienie pętli opóźniającej pomiędzy kolejnymi zdarzeniami podczas trwania eksperymentu;
- przeprowadzić etapy symulacji krok po kroku, obsługiwać je w całym etapie lub jednym zdarzeniu, zapewniając przepływ symulowanego przedziału czasowego w określonym czasie symulacji (czas rzeczywisty);
- zapewnić zatrzymanie symulacji w określonym momencie lub po określonym zdarzeniu.

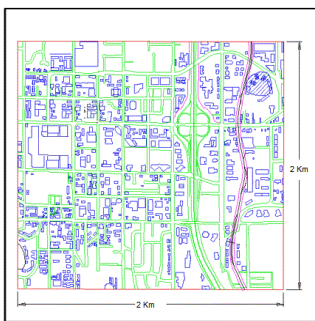
Symulator systemu PRT powinien mieć nawet uproszczony graficzny interfejs umożliwiający edycję (dwuwymiarowego) wykresu sieci PRT, być może na mapie terenu, lub zdjęcia satelitarne, jako tło, okno edycji. Jeśli symulator jest używany do celów projektowych, animacja nie jest faktycznie konieczna, ale jest bardzo pomocna i jest zazwyczaj dostępna, zob. „okno wizualizacji”. Niezależnie od znaczenia dla prezentacji i promocji wyników projektu, także na etapie eksperymentów symulacji, graficzna produkcja ułatwia ocenę pewnych zjawisk, np. obserwacja zacięć, uruchamianie symulacji itd.

Podczas oceny systemu PRT przygotowuje się wiele zestawów parametrów symulacji i powinien zarządzać wieloma plikami z parametrami i wynikami eksperymentów. Ta praca nie jest łatwa i zazwyczaj jest podatna na błędy. Często prowadzi to do powtarzania zestawów eksperymentów. Na przykład, jeśli projektant analizuje sieć PRT ze stałą wartością wszystkich parametrów, z wyjątkiem trzech parametrów, a każdy z tych trzech parametrów jest testowany z czterema różnymi wartościami, liczba symulacji, które muszą wynosić 64. Długie oczekiwanie na wyniki wielokrotnych symulacji, z

wielokrotnymi replikacjami, pogarsza ocenę systemu PRT. W związku z tym przygotowanie eksperymentów i zbieranie wyników powinno być zautomatyzowane, przy pomocy „panelu kontrolnego”.

Środowisko systemu zostało pomyślnie opracowane w ramach projektu system PRT. Szczególnie warto wspomnieć o rozwoju algorytmów wieloparametrycznych: zarządzanie pojazdami i wybór trasy dynamicznej. Symulacja zachowań sieciowych systemu PRT w szeregu różnych poziomów odniesienia i porównania rezultatów pozwala wyciągnąć wnioski bardziej ogólnie niż w przypadku konkretnych studiów przypadków, odnosząc się do bardzo specyficznych warunków danej sieci PRT. Władze lokalne, administrator obszaru handlowego, lotniska, itp. Powinny być świadomi zalet sieci PRT i jej wykonalności technicznej z aktualnym stanem wiedzy.

Analizowany obszar obejmuje 11,27km<sup>2</sup> i obecnie nie jest bardzo gęsto zabudowany, ponieważ wiele jego budynków to pojedyncze budynki w otoczeniu parkingów. Rys. 27. jest mapą śródmieścia, która pokazuje niektóre z jego głównych cech, zwłaszcza autostrady, która przechodzi przez jej wschodnią stronę.

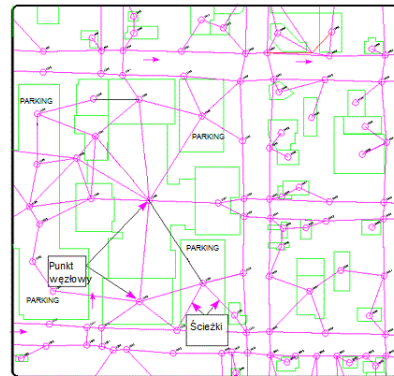


**Rys. 27.** Charakterystyka obszaru dla projektowanego systemu PRT

Źródło: Opracowanie własne

Śródmieście miasta „X” służy do zilustrowania sposobu, w jaki może być zastosowany komputerowo wspomagany projekt dla zaprojektowania sieci PRT, która będzie najlepiej zorientowana na konsumenta. Ponieważ cały dostęp do systemu PRT musi odbywać się przez przejście do stacji PRT, podejście to wskazuje na określenie liczby i lokalizacji stacji PRT jako najważniejszego znaczenia. Zasadniczo oznacza to, że stacje powinny znajdować się najbliżej grup osób, które mogą ich używać. Liczba stacji powinna być wystarczająco duża, aby zapewnić dużą część osób w odległości krótkiego spaceru, tj. około 5 minut bądź mniej, jak to możliwe. Rys. 28. ilustruje część sieci chodników wykorzystywanych w badaniu. W większości przypadków budynek jest reprezentowany przez pojedynczy punkt, a przejścia do i z budynku są reprezentowane jako linie proste do przyległych chodników. Bardziej szczegółowa sieć optymalnych dróg do stacji prawdopodobnie dawałaby dłuższe czasy spaceru niż te obliczone w badaniu. Obejmowałyby węzły i mniej bezpośrednie ścieżki, które zwykle nie mają zastosowania w rzeczywistym środowisku chodzenia w mieście.

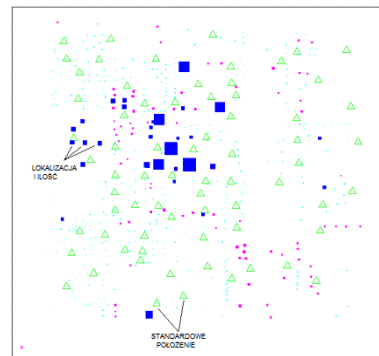
Drugim elementem bazy danych jest opis miejsc potencjalnych lokalizacji największych grup klientów systemu PRT. Idealnie przeprowadzono pełne badanie popytu w celu zidentyfikowania lokalizacji i liczby potencjalnych klientów. Rezultatem jest lista lokalizacji (węzłów) z liczbą osób, z którymi każdy będzie musiał chodzić do najbliższej stacji PRT, aby uzyskać dostęp do systemu. Stworzono przybliżoną reprezentację rozkładu przestrzennego popytu, liczby osób, w centrum w badanym obszarze. Wyświetlacz (mapa) tej bazy danych zapotrzebowania została pokazana na Rys. 29..



**Rys. 28.** Zakładane trasy podróży pieszych

Źródło: Opracowanie własne

Trzeci element bazy danych opisuje zestaw wszystkich pożądanych i możliwych lokalizacji stacji PRT. Idealnie byłoby, gdyby dane te pochodziły z szeregu źródeł i sprawdzane były z wnioskami inspekcji terenowych i rozmowami z właścicielami nieruchomości i innymi, którzy są dokładnie zaznajomieni z obszarem. W tym badaniu zidentyfikowano 70 lokalizacji oznaczonych trójkątami, które są analizowane w bazie danych.



**Rys. 29.** Zapotrzebowanie na stacje PRT

Źródło: Opracowanie własne

Charakterystyka mikroskopowej bazy danych dla śródmieścia, która została zakodowana w tym badaniu, jest następująca:

- Liczba węzłów sieciowych (zarówno sieci automatycznych, jak i dla pieszych): 1.116;
- Liczba łączy sieciowych (zarówno automatycznych i pieszych): 5.098;
- Liczba miejsc popytu: 555;
- Liczba potencjalnych miejsc na stacje PRT: 70;
- Liczba węzłów sieciowych, które mają karę opóźnienia w ruchu: 410;
- Średnie zapotrzebowanie węzłowe: 103 osoby;
- Zakres popytu wśród węzłów popytu: od 2 do 1882 osób.

### 3.5. Analiza wydajności systemu PRT

Oprócz opracowania bazy danych planista PRT musi opracować zestaw celów wydajności systemu PRT. Powinno to odbywać się w ścisłej konsultacji z zainteresowanymi stronami (klientami) w tym obszarze, tak aby istniało ogólne porozumienie co do poziomu skuteczności systemu PRT. Ponieważ jest to podejście zorientowane na konsumentów, głównym celem będzie liczba osób w ciągu X minut spaceru do najbliższej stacji PRT. Na przykład można założyć, że system powinien być zaprojektowany tak, aby 75% osób mogło dotrzeć do stacji z odległości 5 minut lub mniej, 90% z odległości 10 minut lub mniej i 100% z odległości spaceru 15 minut lub

mniej. Te liczby można interpretować jako reprezentujące „zasięg” dostarczony przez system.

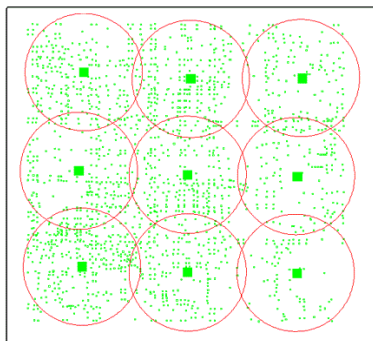
Te wartości pokrycia miałyby odzwierciedlać pragnienia klientów, którzy mogliby wziąć pod uwagę wiele czynników lokalnych, np. brak chodników. Można również zdefiniować wiele innych celów projektowych. Przykładowo:

- średnie długości, w minutach, przejście na stację PRT,
- oczekiwane obciążenie każdej stacji w systemie oraz średnia przyłożenia stacji.

Aby ten przykład analizy był prosty i przejrzysty, zastosowane zostaną tylko wspomniane powyżej środki wspomagające. Dla celów projektowych zakłada się, że początkowe cele pokrycia są określone w następujący sposób:

- 85% w ciągu 5 minut,
- 95% w ciągu 10 minut,
- 100% w ciągu 15 minut czasu przejścia spacer.

Należy najpierw określić, ile jest stacji, w których lokalizacje spełniają ten cel. Ponieważ jest 70 punktów rozważanych jako stacje, zadanie staje się jednym z wyznaczników najmniejszego podzbioru tych 70 lokalizacji, które mogą spełnić określony cel pokrycia, który określono w trzech powyższych punktach. W tym celu określono górne i dolne krawędzie tego typu problemu, aby można było zminimalizować wymagany wysiłek wyszukiwania. Jako niższe założenie można użyć konwencjonalnego podejścia mówiącego, że trzeba co najmniej jedną stacją PRT, co pół kilometra do stacji PRT. Ta zasada zakłada, że popyt jest równomiernie rozłożony i że chodzenie w dowolnym kierunku, to każdej ze stacji, jest równie łatwe i szybkie, co oczywiście nie jest, co wynika z ukształtowania terenu itp. Jak pokazano na Rys. 30., zastosowanie tej zasady do centrum skutkuje powstaniem dziewięciu stacji oddalonych o około pół kilometra.



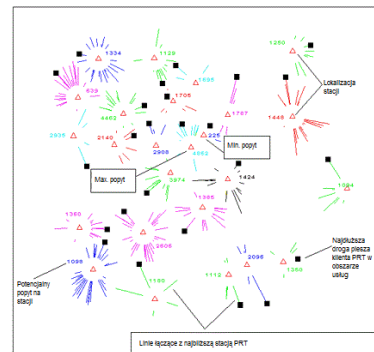
**Rys. 30.** Projekt minimalny 9 stacji PRT rozmieszczonych co pół kilometra

Źródło: Opracowanie własne

Gdy obliczane są zakresy pomiarów dla tych dziewięciu stacji, w przedziałach czasowych 5, 10 i 15 minutowych definiowane są procenty w wysokości 30%, 62% i 89%. Ponieważ te wartości są niewystarczające w stosunku do celów projektowych, wynik ten wskazuje, że na pewno potrzebne jest więcej niż 9 stacji.

W tym badaniu podjęto decyzję o pierwszym wyszukiwaniu w tym systemie przy użyciu tylko 18 stacji. Generowano i oszacowano około 2500 różnych wzorców lokalizacji 18 stacji, zanim nie udało się znaleźć żadnych dalszych ulepszeń. Wynik pokrycia uzyskany w pięciominutowym przedziale czasowym wyniósł 63,2%, a mimo to był zbyt krótki od wymaganego poziomu 85%. Następnie przeprowadzono drugie wyszukiwanie przy użyciu 25 stacji, a 5-minutowy zasięg wzrósł do 81,5%, blisko celu 85%, ale jeszcze nie wystarczający. Kilka ekranów użytego narzędzia C-CAD OPTIMAL generuje mapy, które mogą pomóc dostrzec inne aspekty jakości tego 25-

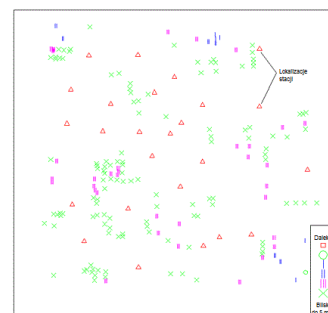
stacyjnego wyniku. Rys. 31. przedstawia obszary obsługi dla każdej stacji w tej 25-stacjiowej konstrukcji PRT.



**Rys. 31.** System dla 25 stacji PRT

Źródło: Opracowanie własne

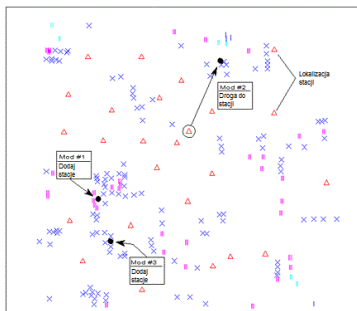
Pokazano również liczby osób w każdym obszarze usług oraz najdłuższa podróż w obie strony. Liczba ładunków stacji (liczba osób) w każdym obszarze usług wynosi od 225 do wysokiego poziomu 4,862. Wysoki popyt nie jest zwykle problemem, ponieważ stacja PRT może mieć tyle miejsc do postojów, ile potrzeba, aby je przyjąć. Niski popyt jest problemem, ponieważ każda stacja musi mieć wystarczająco dużo potencjalnego popytu, aby uzasadnić jego włączenie do projektu.



**Rys. 32.** Otwarte lokalizacje dla 25 stacji pod względem czasu pieszo dotarcia do nich

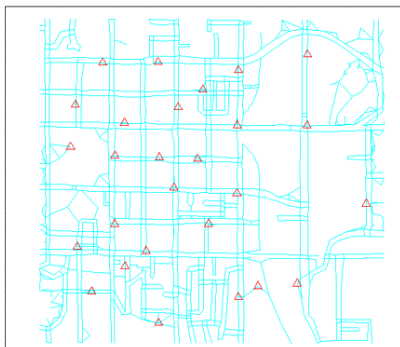
Źródło: Opracowanie własne

Oznacza to, że osoba pochodząca z tych miejsc będzie musiała chodzić dłużej niż 15 minut, aby dotrzeć do najbliższej stacji PRT. Ta mapa może służyć jako przewodnik po planistę w lokalizowaniu i wprowadzaniu modyfikacji projektowych, które zapewnią lepsze osiągnięcie zasięgu. Następnym krokiem w procesie projektowania sieci PRT jest znalezienie jednego lub kilku sposobów na poprawę wydajności systemu. Chociaż nie ma jednego sposobu na to, planista zazwyczaj wykorzystuje mapę w celu zidentyfikowania niektórych modyfikacji projektowych, które mogą okazać się wydajne. Lokalizacje popytu są oznaczone kolorami, które pokazują stacje, które są względnie bliżej lub dalej od stacji, co przedstawiono na Rys. 33.. Korzystając z tej mapy, podjęto decyzję o dodaniu kolejnej stacji w obszarze o małym zasięgu.



**Rys. 33.** Trzy modyfikacje projektu dla systemu PRT  
*Źródło: Opracowanie własne*

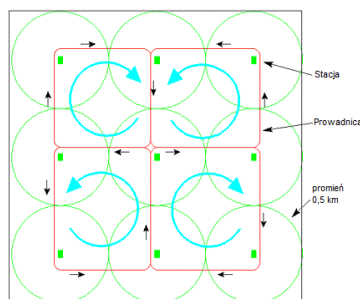
Według założeń modyfikacja 1 podniosłaby 5-minutową proporcję do 83,6%, co jest właściwą poprawą. Następnie stacja została przemieszczona z miejsca o niskim zapotrzebowaniu do obszaru o słabym zasięgu, jak pokazano na modyfikacji nr 2. Wynik wyniósł 84,7%. Następnie dodano kolejną stację do obszaru o słabym zasięgu (nr 3), a otrzymana wartość wynosiła 5 minut, czyli 85%, co zapewnia 5-minutowy cel pokrycia czasu oczekiwania (a także 10 i 15-minutowego spaceru klientów do stacji PRT). Na Rys. 34. jest mapa pokazująca lokalizację 27 stacji według preferowanego wzoru.



**Rys. 34.** Lokalizacje 27 stacji w preferowanym rozwiązaniu systemu PRT

*Źródło: Opracowanie własne*

W wyniku lokalizacji osiemdziesiąt pięć procent ludzi w ciągu 5 minut od stacji PRT, a dziewięćdziesiąt jeden procent w ciągu 6 minut. Rys. 35. jest ilustracją konwencjonalnego podejścia do projektowania prowadnic systemu PRT. Stacje sąsiadujące są połączone z pętlą jednokierunkową, a kierunek jazdy w tych pętlach jest alternatywny, tzn. w kierunku zgodnym z ruchem wskazówek zegara lub w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.



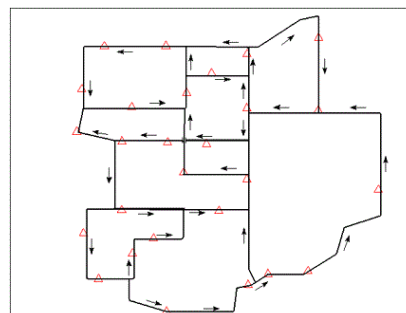
**Rys. 35.** Kierunki prowadnic w preferowanym rozwiązaniu systemu PRT

*Źródło: Opracowanie własne*

Na Rys. 36. przedstawiono jeden z kilku możliwych układów prowadnicy PRT, które łączą wszystkie 27 stacji w rozsądnie spójnej konfiguracji. Jeśli dostępne są dane pochodzenia, mogą być

wykorzystane do wspomagania procesu projektowania wyrównania prowadnicy, zapewniając, że największe przepływy są połączone tak bezpośrednio, jak to możliwe. W tym procesie niektóre stanowiska stacji mogą wymagać korekty, a wydajność systemu w stosunku do jego bliskości wobec klientów jest ponownie obliczana. Zwykle niektóre korekty wydajności mogą wynikać z takich korekt, ale możliwe jest również, że można osiągnąć pewne poprawki.

Gdy ustalona zostanie wyrównanie linii trasowania, sieć może być wykorzystana do przeprowadzania różnorodnych symulacji operacyjnych, które określają, czy może on pracować w skuteczny sposób w wybranym zestawie różnych warunków ładowania. Ta sieć symulacji musiałaby zawierać, co najmniej jeden magazyn dla pustych pojazdów. Znajdowanie takich bocznic jest problemem podobnym do problemu lokalizacji stacji. Powinny być umieszczone tak, aby podróż pustych pojazdów była zminimalizowana, a także służyła wielu innym celom i ograniczeniom.



**Rys. 36.** Zaprojektowany dla 27-stacyjnego systemu PRT  
*Źródło: Opracowanie własne*

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono projekt systemu cyrkulacji PRT dla dzielnic na obrzeżach miasta. Położono szczególny nacisk na zaspokojenie potrzeb potencjalnych pasażerów, którzy korzystają z najbliższej stacji PRT. W tym celu posłużono się narzędziem projektowym C-CAD OPTIMAL. W pracy podkreślono, że podczas szczytowych godzin ruchu najczęstszym używaniem PRT jest, prawdopodobnie wyjazd do domu i z pracy do domu. Wnioskuje się, że o popularności systemu PRT będą decydować deficyty aktualnie stosowanych systemów komunikacji miejskiej. Zauważa się, że w przypadku komunikacji miejskiej sieć jest często niedostosowana do potrzeb pasażerów, pod względem jej lokalizacji. Zauważono, że współczesna komunikacja miejska dostosowana jest do transportu grupowego, nie zaś do potrzeb indywidualnych.

System PRT wiąże się z dużymi kosztami wdrożenia. Jednocześnie sieć PRT w dużych miastach musi być budowana w modułach, przez okres co najmniej dziesięciu lat, a pełne korzyści zostaną zrealizowane tylko wtedy, gdy zostanie ono rozbudowane na dużym obszarze metropolitalnym. Dodatkowo by uzyskać wystarczającą pojemność stacji dystrybucyjnej w centrum miast, stacje muszą być blisko siebie. Jest to trudne do osiągnięcia, gdy prędkość linii jest wysoka, a bocznice stacji są długie.

Na podstawie projektu zawierającego opis i ilustracje komputerowo wspomaganego procesu projektowania zidentyfikowano zbiór lokalizacji stacji, które minimalizują wymagania przejazdów i oczekiwania na nierównomiernie rozproszoną populację. Jednocześnie system musi integrować narzędzia programowe związane z zadaniami PRT.

**Bibliografia:**

1. Chebbi O., Chaouachi J., Reducing the wasted transportation capacity of personal rapid transit systems: an integrated model and multi-objective optimization approach, *Transportation research part E: logistics and transportation review* 2016, nr 89, s. 236-258.
2. Choromański W., Kowara J., The selected problems of computer aided design of PRT (Personal Rapid Transit) Vehicles, *Logistyka* 2010, nr 4, s. 1-9.
3. Daszczyk W.B., Mieścicki J., Grabski W., Empty vehicles management as a method for reducing passenger waiting time in personal rapid transit networks, *IET Intelligent Transport Systems* 2014, nr 9, s. 231-239.
4. Domański R., Zespoły sieci komunikacyjnych. *Prace Geograficzne IG PAN*, 41. PAN, Warszawa 1963.
5. Dunning B., Ford I., Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit, *Technology Evaluation* January 2003.
6. Gadziński J., Funkcjonowanie lokalnego systemu transportowego na tle współczesnych procesów urbanizacyjnych w aglomeracji poznańskiej, *Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Poznań*.
7. Irving J.H., Bernstein H., Olson C.L., Buyan J., *Fundamentals of Personal Rapid Transit. Based on a Program of Research at the aerospace corporation*, Lexington Books, Toronto 1978.
8. Jonnes K., Simmons J., *The Retail Environment*. Routledge, Londyn 1990.
9. Kupiec E., Przyborowski W., Metoda wyznaczania i analiza rozkładu indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej silnika indukcyjnego liniowego, *Zeszyty Problemowe–Maszyny Elektryczne* 2013, nr 100, s. 121-126.
10. Li C.H.G., Design of the lower chassis of a monorail personal rapid transit (MPRT) car using the evolutionary structural optimization (ESO) method, *Structural and Multidisciplinary Optimization* 2016, nr 1, s. 165-175.
11. Mrad M., Hidri L., Optimal consumed electric energy while sequencing vehicle trips in a personal rapid transit transportation system, *Computers & Industrial Engineering* 2015, nr 79, s. 1-9.
12. Parteka T., Konstruktynwa i destruktywna rola transportu w kształtowaniu treści i formy miast. *Czasopismo Techniczne. Architektura* 2010, 107, 1A, s. 95-109.
13. Personal Rapid Transit via Magnetic Levitation, Trond Andresen <trond.andresen@itk.ntnu.no> Department of Engineering Cybernetics The Norwegian University of Science and Technology (NTNU) Trondheim, Norway 2016.
14. Schneider J.B., Designing a High Performance PRT Network for an Edge City, University of Washington, Seattle, <https://faculty.washington.edu/jbs/itra ns/prtconfw.htm> (dostęp: 23.10.2018).
15. Schneider, J.B., Transit and the Polycentric City, Final Report, DOT-1-81-33, U.S. Department of Transportation, Urban Mass Transportation Administration: Washington, D.C. 1981, 294.
16. Schneider, J.B., Jun M., Designing Personal Rapid Transit (PRT) Networks, *Journal of Advanced Transportation* 1991, 25:3, s. 247-268
17. Schneider, J.B., A PRT Deployment Strategy to Support Regional Land Use and Rail Transit Objectives, *Transportation Quarterly* 1992, 46:1, 135-153.
18. Schneider, J.B., 1993, Designing APM Circulator Systems for Major Activity Centers : An Interactive Graphic Approach, in *Proceedings, Automated Peplemovers IV: Enhancing Values in Major Activity Centers*, edited by W.J. Sproul, E.S. Neumann and M.V.A. Bondada, American Society of Civil Engineers: New York, N.Y., 535-545.
19. Szaruga E., Problem ekonomicznej wyceny zewnętrznych kosztów transportu drogowego w budowaniu algorytmu zrównoważonego rozwoju (Polska na tle Unii Europejskiej) (w:) *Zrównoważony rozwój – Debiut naukowy* 2011, T. Jemczura, H. Kretek (red.), Rada Wydawnicza Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Raciborzu, Racibórz 2012.
20. Taylor Z., Geografia transportu i jej wkład do teorii geografii: próba oceny, *Przegląd Geograficzny* 2000, nr 72, s. 491-503.
21. <http://www.ultraglobalprt.com/wheres-it-used/heathrow-t5/> (3.07.2017).
22. <http://www.vectusprt.com/EN/first-project/> (3.07.2017).
23. <https://www.2getthere.eu/projects/masdar-prt/> (3.07.2017).
24. Masdar City Testing EVs That Drive Themselves, <https://www.fastcompany.com/1520148/masdar-city-testing-evs-drive-themselves> (3.07.2017).
25. Morgantown, West Virginia: Personal Rapid Transit (PRT), <http://www.itbell.net/transit/Morgantown/> (3.07.2017).
26. Personal Rapid Transit Deployment Plan, JPODS INC. USA, Cleaner. Faster. Safer. Affordable 2016, s. 43.
27. Chojnacki Michał: System informatyczny sterowania i zarządzania ruchem PRT, Praca dyplomowa magisterska, Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Radom 2018 r.

**The concept of the PRT traffic control and management system**

The paper presented the PRT (Personal Rapid Transit) control and traffic management system. The genesis of the use of information systems for control and PRT traffic management was made. The concept of the PRT system was defined, a review of these systems and their structure was carried out. The mechanical and ergonomic systems of PRT vehicles have been described. The chassis structure and the ergonomics of the PRT vehicle cabs have been characterized. The process of estimating traffic conditions and simulations of exemplary PRT vehicles have been described. An analysis of the PRT system was carried out, the purpose of which is to determine the optimal number of PRT stations guaranteeing optimal service provision, in terms of the demand for PRT services. The stages of designing the PRT circulation system for districts on the outskirts of the city are illustrated. The OPTIMAL program tool (C-CAD) has been used.

**Keywords:** Personal Rapid Transit PRT, transport.

**Autorzy:**

Prof. dr hab. inż. **Mirosław Luft**, prof. zw. – Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, e-mail: [m.luft@uthrad.pl](mailto:m.luft@uthrad.pl)

Dr inż. **Daniel Pietruszczak** – Wydział Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, e-mail: [d.pietruszczak@uthrad.pl](mailto:d.pietruszczak@uthrad.pl)

Mgr inż. **Michał Chojnacki** – absolwent (2019 r.) Wydziału Transportu i Elektrotechniki Uniwersytetu Technologiczno-Humanistycznego im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, ul. Malczewskiego 29, 26-600 Radom, Kierunek Elektrotechnika, Nr albumu 95069