

Wybrane systemy transportu autonomicznego. Systemy PRT. Systemy torowe i ich ewolucja

Włodzimierz Choromański, Iwona Grabarek, Maciej Kozłowski, Andrzej Czerepicki, Katarzyna Anna Marczuk

Trudno dzisiaj jednoznacznie powiedzieć, kto był prekursorem pojazdu autonomicznego. Niewątpliwie idea pojazdu poruszającego się samodzielnie od dawna nurtowała inżynierów, specjalistów transportu, a jej początki sięgają jeszcze czasów przed II wojną światową. W roku 1926 amerykańska firma Chandler Motor Car eksperymentowała z samochodem sterowanym pośrednio przez kierowcę siedzącego w podążającym za pojazdem samochodzie. Konstrukcją bliższą współczesnemu rozumieniu pojazdów autonomicznych było rozwiązanie opracowane w 1956 roku przez firmę General Motors. Model FireBird II poruszał się wzdłuż przewodu elektrycznego znajdującego się w podłożu drogi. W 1995 roku eksperymentalny pojazd VaMP przejechał ponad 1000 m bez pomocy człowieka i był to prawdopodobnie pierwszy samochód autonomiczny mogący poruszać się po określonym obszarze. Opracowany został przez zespół Mercedesa (we współpracy z Uniwersytetem Bundeswehry) w ramach projektu Eureka-Prometeusz. Pojazd wprawdzie miał potencjalną możliwość jazdy po autostradzie, ale każdy manewr musiał być potwierdzany przez jadącego w nim kierowcę.

Inne podejście do autonomizacji transportu zaproponował w 1956 roku amerykański planista Don Fitcher. Uważa się go za twórcę systemu PRT (*Personal Rapid Transit*). System ten wprawdzie w fazie początkowej wykorzystywał tor (bardzo specyficzny), ale spełniał warunki pojazdu autonomicznego. Obecnie samochody autonomiczne (przede wszystkim na poziomie L4) upodabniają się do współczesnych rozwiązań PRT. Często nawet firmy produkujące pojazdy PRT produkują jednocześnie pojazdy autonomiczne (głównie minibusy). Zasadne jest więc omówienie systemu PRT i współczesnych trendów jego rozwoju.

1. Klasyczne systemy PRT

Przez pojęcie systemu PRT rozumiemy system transportu, który składa się z 3–4-osobowych pojazdów poruszających się po lekkiej infrastrukturze nadziemnej (około 5 m nad powierzchnią ziemi) lub naziemnej – najczęściej po wydzielonym pasie ruchu. Charakterystyczną cechą systemu jest realizacja transportu *point to point* lub *door to door* (z punktu do punktu lub od drzwi do drzwi). Oznacza to, że między przystankiem początkowym a końcowym nie ma żadnych przystanków pośrednich. Pomiędzy miejscem początkowym a docelowym sieć połączeń ma charakter redundantny, co znaczy, że w zależności od aktualnej sytuacji drogowej (kongestie, awarie sieci itp.) pojazd wybiera trasę najbardziej optymalną. Systemy PRT łączą cechy transportu indywidualnego i zbiorowego. Zapewniają znaczny komfort podróży oraz, przy odpowiedniej organizacji, transport na żądanie (*on demand*).



Rys. 1. Fragment sieci PRT zaprojektowany dla Warszawy

Źródło: Opracowanie własne wykonane w ramach projektu „ECO-Mobilność” – kierownik W. Choromański

Na rys. 1 pokazano fragment sieci PRT zaprojektowany w ramach realizacji projektu „ECO-Mobilność” 2009–2016 (Program Operacyjny Innowacyjna Gospodarka – kierownik W. Choromański).

Należy podkreślić istotną różnicę między systemami PRT a systemami APM (*Automated People Mover*). W drugim przypadku mamy do czynienia z pojazdami torowymi o znacząco większej pojemności, poruszającymi się po ściśle określonej trasie, bez możliwości realizacji transportu *point to point*. Systemy APM dotychczas najczęściej możemy spotkać w transporcie lotniskowym (realizowane są w ten sposób np. połączenia między terminalami). Jednym z przykładów takiego transportu jest Sky Train firmy Bombardier, wykorzystywany na lotnisku w Phoenix w Arizonie (rys. 2).

Jak już wspomniano, Personal Rapid Transit jest relatywnie nowym systemem transportu miejskiego. Napęd pojazdów jest elektryczny (jak dotąd). Komisja Europejska postrzega PRT jako potencjalne nowe rozwiązanie dla systemów transportowych w miastach, jakkolwiek sama idea PRT sięga lat 50. XX wieku (narodziła się w USA).

Jedną z pierwszych pozycji literatury ujmującą kompleksowo zagadnienia transportu PRT jest praca Irvinga i in. z 1978 roku. Ukazała się ona przeszło 20 lat po pierwszych



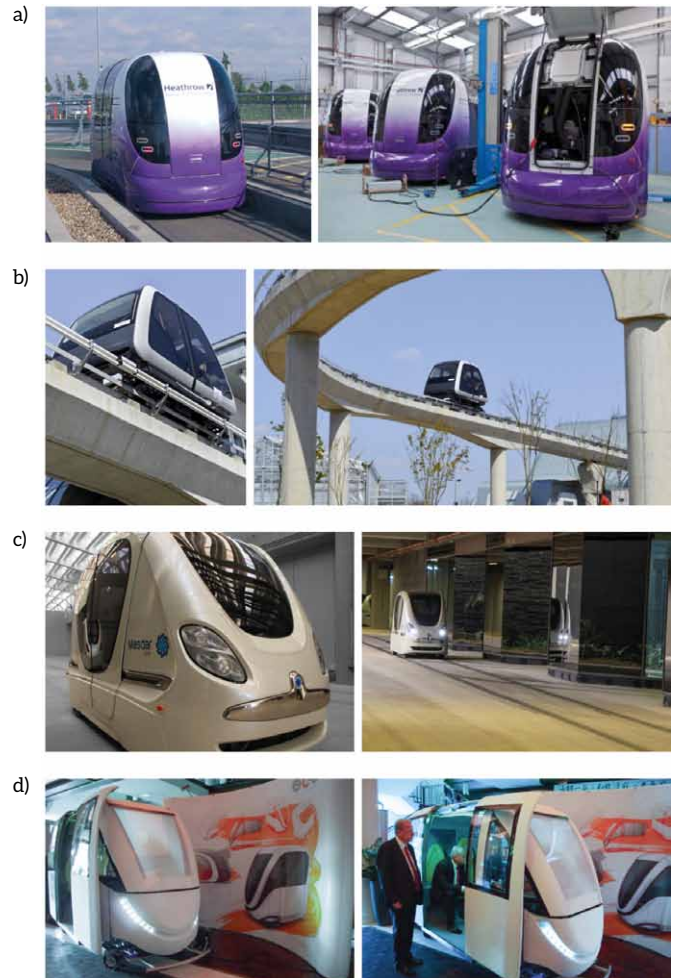
Rys. 2. APM Sky Train firmy Bombardier na lotnisku w Phoenix

pracach wspomnianego już Dona Fichtera – nowojorskiego planisty, którego uważa się za twórcę koncepcji PRT. Literatura dotycząca PRT jest relatywnie uboga. Przeważają prace o charakterze popularnonaukowym, a stosunkowo mało prac ma charakter teoretyczny lub naukowy. W polskiej literaturze warto zwrócić uwagę na prace autora tego rozdziału (Choromański i Kowara 2012; Choromański i in. 2013 a; Choromański i in. 2013 b; Choromański i in. 2013 c; Choromański i Kowara 2011 a; Choromański i Kowara 2011 b; Choromański i in. 2012; Choromański 2007; Choromański i Kowara 2013 e; Kozłowski i Choromański 2013 a; Kozłowski i Choromański 2013 b; Grabarek i Choromański 2014) – poruszające wiele aspektów technicznych systemu PRT, w tym także na dwutomową monografię *Ekomobilność* (Choromański i in. 2015).

Z pozycji zagranicznych na uwagę zasługują publikacje J.E. Andersona (Anderson 2007 i 2011) oraz I. Andreassona (Andreasson 2000 i 2001). Należy przy tym zauważyć, że autorzy są zwolennikami systemów PRT (przede wszystkim tzw. *High Capacity PRT*) i w ich pracach znajdujemy wiele stwierdzeń nie zawsze starannie potwierdzonych analizą teoretyczną. W wielu pozycjach literatury znajdziemy uzasadnienia zastosowań systemów PRT, jednak analizy te są dokonywane na poziomie bardzo ogólnym i rzadko udokumentowane badaniami symulacyjnymi (Andreasson 2000; Andreasson 2001; ATRA 2003). Na szczególną uwagę zasługują pozycje Lowsona (2009) oraz Gustafssona (2009). Autorzy dzielą się w nich doświadczeniami wynikającymi z wdrożenia nielicznych systemów PRT, którymi są: amerykański system w Morgantown, brytyjska ULTRA oraz brytyjsko-szwedzko-koreański Vectus lub PRT firmy 2getthere (rys. 3).

Morgantown nie jest typowym przykładem systemu PRT z powodu większej liczby pasażerów pojedynczego pojazdu (20 osób), która kwalifikuje go raczej do transportu grupowego (*Group Rapid Transit*, GRT), ale często jest wymieniany w literaturze jako wczesny pierwowzór systemów PRT. Projekt ten był zrealizowany w 100% ze środków federalnych USA. Jednak nigdzie więcej go nie zastosowano z powodu dużej szerokości toru oraz związanej z tym masywnej i drogiej w wykonaniu konstrukcji nośnej. Ponadto system ten jest drogi w eksploatacji z powodu energochłonnej instalacji topienia lodu i śniegu zalegających w czasie zimy na odkrytej powierzchni jezdni. System obsługuje trasę zawierającą pięć przystanków i jest sterowany całkowicie automatycznie. W dzień funkcjonuje, łącząc dwa końcowe przystanki, natomiast wieczorem zatrzymuje się również na pośrednich stacjach bocznicowych. Nie jest to więc klasyczny system PRT.

Następnym systemem jest brytyjska ULTRA (rys. 3), wdrożona do połączenia parkingu z terminalem 5 lotniska Heathrow w Londynie. Trasa liczy 3,8 km i łączy trzy przystanki. Nie jest to więc rozbudowana sieć PRT. Projekt został wdrożony przez firmę BAA (*British Airport Association*), która w 2005 roku podpisała umowę z właścicielem projektu – firmą ATS. Konstrukcja systemu jest prosta i tania. Bazuje ona na zasilanych z akumulatorów 4-osobowych pojazdach poruszających się po płaskich betonowych jezdniach usytuowanych na poziomie gruntu lub na słupach nośnych na wysokości kilku metrów, jeżeli wymaga tego konfiguracja terenu. Bezzałogowe



Rys. 3. System Ultra zainstalowany na lotnisku Heathrow (a); system Vectus (b); system firmy 2getthere (c); polski system PRT zbudowany na Politechnice Warszawskiej w ramach realizacji projektu „ECO-Mobilność” (d)

pojazdy o lekkiej konstrukcji są napędzane tradycyjnymi silnikami elektrycznymi, a do ich automatycznego sterowania oraz zmiany kierunku poruszania się na rozjazdach wykorzystuje się czujniki magnetyczne rozmieszczone wzdłuż trasy. Warto wspomnieć, że twórcą systemu PRT był Brytyjczyk, profesor Martin Lowson. Prototyp systemu tworzony był na uniwersytecie w Bristolu, ze znaczącym udziałem studentów.

Systemy pokazane na rys. 3 zostały wykonane w bardzo różnych technologiach. Dotyczy to zarówno systemów mechanicznych i układów jezdnych (koła stalowe poruszające się po szynach, koła ogumione), jak i układów napędowych (elektryczne silniki obrotowe lub liniowe), układów rekuperacji energii, wreszcie – układów sterowania. W zasadzie poza systemem opracowanym w Politechnice Warszawskiej (niestety niewdrożonym) żaden układ nie realizuje wszystkich typowych cech systemów PRT, w tym przede wszystkim nie ma cech transportu *point to point*. Wstępne badania systemu PRT wskazują, że na aktualnym poziomie techniki system ten nie zastąpi miejskiego transportu masowego (metro, monorail). Czy w ogóle idea *high capacity* PRT jest realistyczna, trudno dzisiaj powiedzieć. Na razie zastosowanie systemu PRT upatruje się jako transportu

uzupełniającego o charakterze lokalnym, np. z nowych dzielnic do dużego huba transportowego, np. stacji metra.

2. Problemy symulacji i algorytmy sterowania systemu PRT

Zanim przejdziemy do problemów symulacji i sterowania pojazdami PRT, przedstawimy elementy struktury rzeczywistego systemu PRT i jego modelu (tzw. modelu nominalnego). W tym podrozdziale opisano przyjęty nominalny model sieci PRT wraz ze wszystkimi jego komponentami. W prezentowanym podejściu sieć PRT składa się z następujących elementów:

- pojazdów PRT;
- przystanków;
- zajezdni;
- szlaków komunikacyjnych;
- skrzyżowań (zjazd i rozjazd);
- potoków pasażerów.

W modelu przyjmujemy, że wszystkie szlaki komunikacyjne są jednokierunkowe (tzn. nie jest możliwa kolizja pojazdów jadących w przeciwnym kierunku). Szlaki komunikacyjne są odcinkami łączącymi stacje, garaże oraz skrzyżowania. Poruszają się po nich pojazdy PRT zgodnie z zasadami ruchu i ograniczeniami występującymi na poszczególnych szlakach komunikacyjnych. Schemat modelu nominalnego wraz z wyróżnionymi elementami sieci PRT przedstawiono na rys. 4.

Dalszym uszczegółowieniem modelu nominalnego jest zdefiniowanie jego parametrów oraz ich identyfikacja.

Pojazd PRT

Pojazdy poruszające się w sieci PRT charakteryzują następujące właściwości:

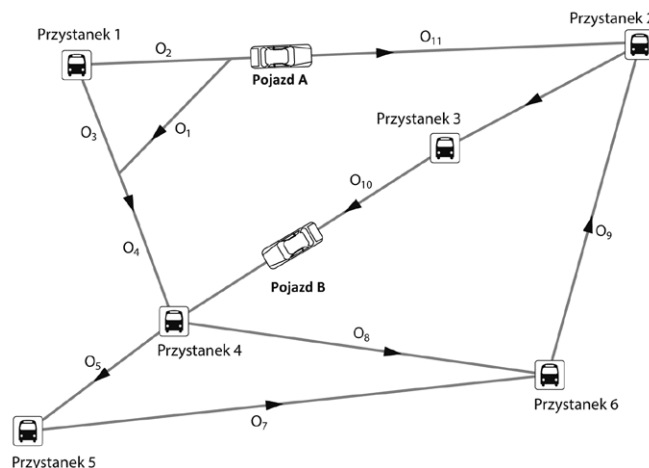
- liczba miejsc dla pasażerów (zwykle 4 lub 5);
- priorytet (niektóre pojazdy mogą być wyróżnione i uprzywilejowane);
- osiągi (w tym między innymi przyspieszenie, opóźnienie oraz maksymalna prędkość);
- parametr eksploatacyjny – wypełnienie pojazdu, tzn. ilu pasażerów ma pojazd; ten parametr jest wygodnie przyjąć jako dyskretną zmienną losową o zadanym rozkładzie;
- parametr eksploatacyjny – dopuszczalna prędkość.

Szlak komunikacyjny

Szlaki komunikacyjne reprezentują elementy systemu torowego, po którym poruszają się pojazdy PRT. Podstawową jednostką szlaków komunikacyjnych jest segment Q_i (rys. 4). Jest to fragment toru łączący bezpośrednio dwa wydzielone punkty sieci – stacje, skrzyżowania lub zajezdnie. Każdy segment charakteryzują następujące parametry:

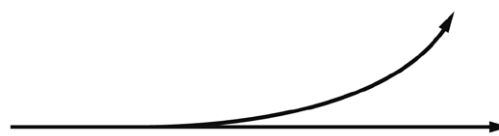
- długość;
- maksymalna dozwolona prędkość, z którą może poruszać się po nim pojazd;
- kierunek poruszania się pojazdów;
- priorytet (reprezentuje kategorię szlaku komunikacyjnego, np. magistrała główna, segment dojazdowy itp.).

Zbiór szlaków komunikacyjnych oznaczmy literą Q . W istocie mamy do czynienia z wektorem $Q = [Q_i]_{i=1, N}$ liczba szlaków komunikacyjnych zawarta w sieci.

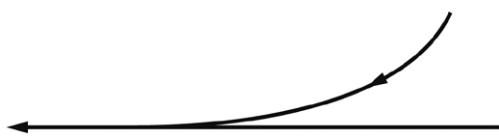


Rys. 4. Model nominalny sieci PRT

Źródło: opracowanie własne



Rys. 5. Rozjazd szlaku komunikacyjnego



Rys. 6. Zjazd szlaków komunikacyjnych

Skrzyżowania

W miejscach przecięcia się szlaków komunikacyjnych znajdują się skrzyżowania. Wyróżniamy dwa rodzaje skrzyżowań – rozjazdy i zjazdy, które przedstawiono na rys. 5 i 6.

Każde skrzyżowanie, a zwłaszcza skrzyżowanie kolizyjne typu zjazd, jest koordynowane przez moduł zarządzania ruchem, decydujący o uszeregowaniu pojazdów PRT według reguł pierwszeństwa przejazdu.

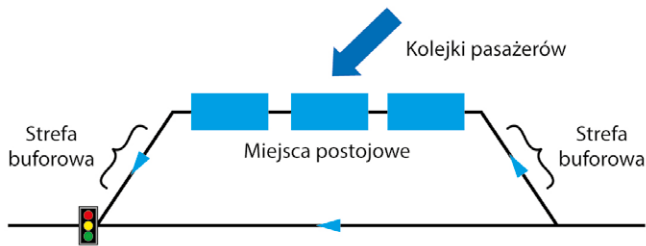
Przystanek

Przystanki, będące ważnymi elementami sieci PRT, są miejscami, w którym pasażerowie zamawiają pojazdy oraz na nie czekają, wsiadają i wysiadają. W systemie rozróżniamy dwa rodzaje przystanków: bez zatok (FIFO) oraz z zatokami. Na przystanku bez zatok (rys. 7) obowiązują zasady kolejki FIFO – pojazd, który wjechał pierwszy na przystanek, opuszcza go również jako pierwszy.

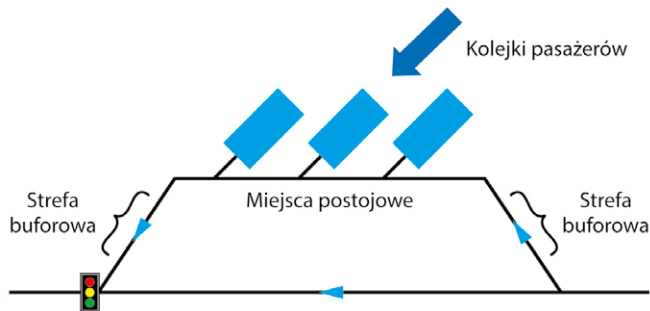
Drugim rozważanym przystankiem jest przystanek z zatokami (rys. 8), który pojazdy PRT mogą opuszczać niezależnie.

W sieci PRT przystanki charakteryzują następujące parametry:

- rodzaj (bez zatok lub z zatokami);
- liczba miejsc postojowych;
- długość buforów (przed i po miejscach postojowych).



Rys. 7. Przystanek bez zatok (FIFO)



Rys. 8. Przystanek z zatokami

Zajezdnia

Zajezdnia jest miejscem, z którego pojazdy rozpoczynają ruch i do którego wracają w celu obsługiwanego lub garażowania. Podstawowym parametrem charakteryzującym zajezdnię jest liczba miejsc postojowych.

Model symulacyjny

Model symulacyjny systemu PRT jest implementacją modelu nominalnego omówionego poprzednio wraz z regułami ruchu. Główne reguły wymieniono poniżej.

1. Między pojazdami musi być zachowana właściwa separacja. W przypadku sytuacji wymagającej nagłego hamowania nie dopuszcza ona do kolizji sąsiadujących ze sobą pojazdów. Separacja jest funkcją prędkości i maleje ze zmniejszaniem prędkości, np. w strefie buforowej przystanków spada do około 0,5 m.
2. Przy zachowaniu odpowiedniej separacji pojazd dąży do osiągnięcia maksymalnej prędkości dopuszczalnej na danym szlaku.
3. Pojazd stara się zachować płynność jazdy, to znaczy zredukować nadmierne przyspieszenia i opóźnienia.
4. Pojazd stara się zredukować zużycie energii.
5. Na skrzyżowaniach obowiązuje pierwszeństwo dla pojazdu bardziej uprzywilejowanego.

Głównym celem symulatora sieci PRT jest możliwość badania przepustowości oraz wydajności dowolnego systemu PRT. Na podstawie przeprowadzonych symulacji można dokonać optymalizacji algorytmów sterowania ruchem pojazdów. Proponowany model umożliwi przeprowadzenie eksperymentów umożliwiających analizę zdolności wykonania zadania transportowego, czyli określenie, w jakim czasie pojazdy w sieci są w stanie przewieźć pasażerów do celu ich podróży. Analizie

mogą zostać poddane różne warianty obciążenia sieci, np. w godzinach szczytu, porannych, nocnych. Dodatkowo model umożliwi przetestowanie algorytmów zarządzania pojazdami, wybór i modyfikację tras podróży, zarządzanie ruchem pojazdów pustych itp.

Symulator ruchu pojazdów PRT posługuje się modelem złożonego automatu komórkowego. Automaty komórkowe są to struktury opisane przez siatkę komórek oraz ich stany, przejścia i reguły tych przejść. Każdy prosty automat komórkowy składa się z n -wymiarowej regularnej, dyskretnej siatki komórek, w której wszystkie komórki są takie same, a cała przestrzeń siatki musi być zajmowana przez komórki ułożone obok siebie. Każda z komórek ma jeden stan należący do skończonego zbioru stanów. Ewolucja każdej komórki przebiega według tych samych, ściśle określonych reguł lokalnych, które zależą wyłącznie od poprzedniego stanu komórki oraz od stanów skończonej liczby komórek – sąsiadów. Ewolucja następuje w dyskretnych przedziałach czasowych jednocześnie dla każdej komórki. W automacie komórkowym komórka jest automatem skończonym.

W celu symulowania ruchu PRT zaproponowano adaptację automatów komórkowych do bardziej złożonej struktury, którą jest graf skierowany reprezentujący infrastrukturę sieci PRT.

Jedna komórka odpowiada zadanej jednostce drogi i jest parametrem modelu (wszystkie pozostałe parametry, w tym prędkość, są reprezentowane w odniesieniu do tej jednostki). Każdy pojazd w modelu porusza się z prędkością całkowitą zawartą w przedziale od 0 do V_{max} .

W symulatorze sieci PRT zaimplementowano model układu topologicznego składający się z 2-wymiarowej regularnej, dyskretnej siatki komórek, stanowiącej warstwę abstrakcji nad grafem skierowanym. W grafie tym węzły są elementami sieci PRT (przystanki, skrzyżowania), natomiast krawędzie określają kierunek przemieszczania się między węzłami. Każdy węzeł odpowiada jednej komórce w 2-wymiarowej siatce.

Parametrem modelu jest konfiguracja opisująca między innymi infrastrukturę sieci pojazdów PRT wraz z informacjami o początkowym położeniu pojazdów, ich parametrach, lokalizacji przystanków i garaży oraz potoku pasażerów (skąd, dokąd, kiedy i ilu pasażerów chce podróżować). Dla każdego pojazdu symulator posługuje się algorytmem wyznaczania optymalnej trasy dojazdu do ustalonego celu. Zaimplementowany model stanowi szkielet symulacji rzeczywistego ruchu pojazdów PRT. Przyjęte rozwiązanie umożliwia dynamiczne sterowanie pojazdami podczas jazdy.

2.1. Realizacja modelu

W symulatorze ruchu PRT infrastruktura sieci jest reprezentowana jako graf skierowany

$$G = (V, E) \quad (1)$$

gdzie:

$V = \{v_i; i \in I\}$ – zbiór wierzchołków, $v_i \in \{\text{PRZYSTANEK}_{szeregowy}, \text{PRZYSTANEK}_{zatokowy}, \text{ZAJEZDNIA}, \text{SEKTOR}\}$;

$E = \{e_j; j \in J\}$ – zbiór skierowanych krawędzi, $e_j = (v, w)$ dla $v, w \in V$.

Zbiory I oraz J są ustalonymi zbiorami indeksów odpowiednio dla wierzchołków i krawędzi.

Graf G , reprezentujący statyczne właściwości sieci PRT, został wzbogacony o funkcję stanu, w sposób dyskretny opisującą stan sieci PRT w czasie, tj. lokalizację poszczególnych pojazdów PRT oraz ich dynamiczne właściwości.

Każdy wierzchołek może znajdować się w jednym z dwóch stanów:

- zajęty – gdy w danym miejscu znajduje się pojazd PRT;
- wolny – w przeciwnym przypadku.

2.1.1. Opis reguł ruchu

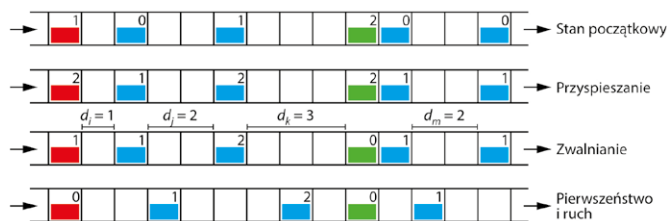
W chwili ustalenia struktury grafu odzwierciedlającego topologię sieci PRT elementy dynamiczne (tj. pojazdy, zajezdnie, skrzyżowania, moduły logiczne) otrzymują warunki początkowe (między innymi położenia, prędkości, wagi). Po ustaleniu i zdefiniowaniu wszystkich elementów składowych automatu komórkowego można przejść do opisu reguł określających ewolucję automatu w czasie.

Jak wspomniano, wszystkie komórki zmieniają stan synchronicznie, realizując pojedynczy „tik” (krok iteracji) upływu czasu. Realizację tiku można podzielić na kilka faz, które scharakteryzowano poniżej.

1. Sprawdzanie reguł przejść – w tej fazie jest sprawdzany aktualny stan komórki oraz stany komórek sąsiednich.
2. Sprawdzanie sąsiedztwa – w tej fazie bada się, czy jedna z komórek sąsiednich nie wchodzi w stan, w którym wykonanie kolejnego kroku iteracji jest niezgodne z założonymi zasadami ewolucji automatu (np. jeden pojazd najedzie na drugi). Takie stany będziemy nazywali konfliktami. Należy wyeliminować wszystkie istniejące konflikty według ustalonych wcześniej reguł (np. przez redukcję prędkości).
3. Sprawdzanie warunków brzegowych – sprawdzane są komórki znajdujące się na krawędziach automatu komórkowego (np. gdy pojazd wjeżdża do zajezdni). Należy je usunąć z automatu (pojazdy przebywające w zajezdni nie biorą udziału w ewolucji automatu do chwili, w której z niej wyjadą).
4. Sprawdzanie liczby iteracji – jeśli jest to automat o skończonym, z góry określonym cyklu życiowym, w tej fazie sprawdza się, czy może nastąpić koniec ewolucji automatu.

Aktualizacja konfiguracji modelu w ramach taktu (automat komórkowy realizuje zmiany stanów synchronicznie) składa się z faz wykonywanych równoległe dla wszystkich pojazdów w sieci (rys. 9), które opisano poniżej.

1. Przyspieszanie – gdy prędkość pojazdu v jest mniejsza od prędkości maksymalnej (ustalonej dla pojazdu bądź na odcinku drogi) oraz dystans do kolejnego pojazdu jest większy niż $v + 1$ komórek, wówczas zwiększ prędkość o jedną jednostkę, czyli wykonaj $v = v + 1$ (drugi wiersz na rys. 9 – ograniczeniem prędkości jest 2, pojazd czerwony zmienił prędkość z 1 na 2).
2. Zwalnianie – jeśli dwa pojazdy poruszają się odcinkiem drogi jeden za drugim w odległości j komórek, upewnij się, czy prędkość pojazdu jadącego z tyłu wynosi co najwyżej j ; jeśli ten warunek nie jest spełniony, zredukuj prędkość do $j - 1$, czyli wykonaj $v = j - 1$ (trzeci wiersz na rys. 9 – pojazd



Rys. 9. Ewolucja automatu komórkowego w czasie

zielony zmniejszył prędkość z 2 do 0, ponieważ przed nim stoi inny pojazd).

3. Randomizacja prędkości (faza opcjonalna) – z prawdopodobieństwem p_1 prędkość pojazdu jest zmniejszana o 1 (jeżeli jest ona większa od 0), czyli $v = v - 1$.
4. Randomizacja awarii (faza opcjonalna) – z prawdopodobieństwem p_2 pojazd ulega awarii na ustalonej liczbie jednostek czasu (wtedy prędkość pojazdu jest ustawiana na 0 przez ten okres).
5. Pierwszeństwo i ruch – jeśli w następnym kroku iteracji (jednostce czasu) pojazd przejeżdża przez skrzyżowanie, sprawdź następujące warunki:
 - gdy nie ma konfliktu na skrzyżowaniu, tzn. inny pojazd z innego kierunku nie będzie w tym samym czasie przejeżdżał przez skrzyżowanie, nie rób nic;
 - w przeciwnym razie ustal kolejność przejazdu pojazdów (za szeregowanie jest odpowiedzialny moduł logiki omawiany w następnym punkcie); pojazd z pierwszeństwem przejazdu przejeżdża normalnie, natomiast pojazdy, które muszą ustąpić, zwalniają i czekają przed skrzyżowaniem;
 - ruch: przenieś pojazdy o v komórek w kierunku jazdy (ostatni wiersz na rys. 9 – pojazd czerwony prawdopodobnie stoi przed skrzyżowaniem, które jest zajęte, ponieważ jego prędkość została zmniejszona do 0; pojazd zielony nadal stoi, a pozostałe pojazdy – niebieskie – zostały przesunięte odpowiednio do przodu).

2.1.2. Opis reguł zarządzania ruchem i sterowania

Głównym zadaniem symulatora jest możliwość dokonania analizy różnych algorytmów sterowania pojazdem pod kątem optymalizacji przepustowości sieci, czyli liczby pasażerów przewiezionych do miejsca docelowego w ustalonym okresie. W przyjętym rozwiązaniu logikę modelu podzielono na następujące moduły:

- moduł wyznaczania trasy przejazdu;
- moduł sterowania wolnymi pojazdami;
- moduł szeregowania pojazdów na skrzyżowaniu;
- moduł przydzielania pojazdu do realizacji zlecenia.

W pierwszej warstwie procesu sterowania ruchem w sieci PRT można wyróżnić dwa najważniejsze algorytmy, które odpowiadają za skuteczne symulowanie ruchu:

- algorytm sterowania ruchem pojedynczego pojazdu;
- algorytm wyboru najkrótszej drogi (a właściwie drogi, która zapewnia najkrótszy czas podróży).

Jednym z podstawowych założeń symulatora systemu PRT jest fakt, że symulacja odbywa się w czasie dyskretnym. Oznacza

to, że stan wszystkich obiektów w systemie jest odświeżany co jednostkę czasu (takt).

Drugim ważnym elementem jest algorytm wyboru najkrótszej drogi. Jest on wykonywany za każdym razem, gdy pojazd wyrusza w drogę (przewozi pasażerów z punktu A do punktu B, pusty wagon wraca z garażu do stacji itp.). Należy zauważyć, że trasa może zostać zaktualizowana w dowolnej chwili (wskutek zmieniającej się sytuacji w sieci).

Proponowany algorytm jest wersją algorytmu wyszukiwania najkrótszej drogi metodą Dijkstry. Ponieważ klasyczny algorytm Dijkstry jest bardzo ogólny i przyjmuje wiele założeń, zaimplementowany w systemie symulacji sterowania ruchem sieci PRT algorytm rozbudowano o dodatkowe sprawdzenia i uwarunkowania. Poszczególne moduły odpowiedzialne za zarządzanie ruchem oraz sterowanie opisano poniżej.

2.1.3. Moduł wyznaczania trasy przejazdu

W celu wyznaczenia ścieżki do punktu docelowego pojazd posługuje się algorytmem wyznaczania najtańszej ścieżki. Proponowany model wykorzystuje dynamiczny algorytm Dijkstry, bazujący na funkcji heurystycznej oceny kosztu przejazdu na elementarnym odcinku drogi. Funkcja ta uwzględnia między innymi następujące parametry:

- odległość;
- oczekiwany czas przejazdu z uwzględnieniem aktualnej sytuacji drogowej;
- ilość energii niezbędnej na przejechanie danego odcinka.

Przyjęty model pozwala na swobodny wybór parametrów (wag) funkcji kosztów. Każdy z modułów zaimplementowano w taki sposób, aby umożliwić parametryzację algorytmów i ich wag. Dzięki temu można przeprowadzać te same eksperymenty ze zmiennymi parametrami. Pozwala to określić optymalne konfiguracje sieci w zależności od typów zadań transportowych.

W przyjętym rozwiązaniu algorytm Dijkstry wykorzystuje następującą funkcję kosztu przejazdu na elementarnym odcinku drogi

$$w(e) = A d(e) + B v_{sr}(e) \quad (2)$$

gdzie:

$e \in E$ – krawędź w modelu;

A, B – wagi;

$d(e)$ – funkcja odległości;

$v_{sr}(e)$ – średnia prędkość na odcinku z ustalonego odcinka czasu (domyślnie przeliczana co 15 min).

Należy zauważyć, że gdy $A = 0$, moduł wybiera najszybszą trasę przejazdu, natomiast dla $B = 0$ moduł wybiera najkrótszą trasę w sensie odległości.

2.1.4. Moduł sterowania wolnymi pojazdami

W sieciach transportowych typu PRT kluczowe znaczenie ma zarządzanie wolnymi pojazdami. Pojazdy mają wiele możliwości – mogą np. udać się do garażu i oczekiwać na zlecenie wyjazdu po pasażera. Alternatywnym wariantem jest oczekiwanie na przystanku (na którym być może pojawi się wkrótce pasażer). Pojazd może przyjąć również strategię krążenia po sieci. Należy pamiętać, że każdy możliwy wariant jest związany

z kosztem, np. energii niezbędnej do przejazdu, blokowaniem stanowiska na przystanku, tworzeniem zbędnego ruchu w sieci. Przyjęty model umożliwia symulowanie różnych zachowań, co z kolei pozwala na dostosowanie ich strategii do konkretnego wdrożenia.

2.1.5. Moduł szeregowania pojazdów na skrzyżowaniu

W modelu komórkowym nie rozstrzygamy bezpośrednio o pierwszeństwie przejazdu. Wyróżniono moduł odpowiedzialny za szeregowanie pojazdów, które zbliżają się do skrzyżowania. Uszeregowanie jest zależne od priorytetu dróg, pojazdów, parametrów skrzyżowania. W szczególnym przypadku dopuszcza się rozpatrywanie skrzyżowań z sygnalizacją świetlną, na których deterministycznie rozstrzyga się pierwszeństwo. Wszystkie wagi wpływające na zachowanie na skrzyżowaniu są parametrami modelu i mogą zostać dopasowane do konkretnego zastosowania.

Dodatковым zadaniem algorytmu jest maksymalizowanie prawdopodobieństwa, że jadąc w ustalonym kierunku, będziemy mieli pierwszeństwo na kolejnych skrzyżowaniach. Rozważaniom poddano mechanizm synchronizujący moduły szeregowania na podstawie informacji o natężeniu ruchu na danym szlaku komunikacyjnym.

Kolejnym czynnikiem wpływającym na algorytm szeregowania jest regulowanie pierwszeństwa przejazdu na podstawie liczby pojazdów znajdujących się na danym szlaku komunikacyjnym. Aby umożliwić testowanie tego typu strategii, model rozszerzono o wagi, na które składają się następujące parametry:

- priorytet drogi, którą porusza się pojazd;
- czas oczekiwania na skrzyżowaniu;
- liczba przewożonych osób;
- priorytet celu, do którego jedzie pojazd.

Zmiana wag pozwala na wyznaczenie optymalnych wartości dla różnych topologii sieci oraz stanów wejściowych symulacji.

Odpowiednia konfiguracja modułu szeregowania może również odzwierciedlić strategię deterministyczną – ustępowanie pierwszeństwa pojazdowi znajdującemu się np. po prawej stronie. Aby nie dopuścić do sytuacji, w której pojazd czeka zbyt długo na skrzyżowaniu, ostateczna decyzja zostaje podjęta również na podstawie czasu oczekiwania.

2.1.6. Moduł przydzielania pojazdu do realizacji zlecenia

Jednym z najważniejszych modułów w opisywanym modelu jest część odpowiedzialna za wybór pojazdu, który ma obsłużyć konkretne zlecenie (gdy pasażer czeka na pojazd na przystanku). Podobnie jak w poprzednich przypadkach, moduł jest konfigurowalny i uwzględniono dwie sytuacje: wybierany jest pojazd, który najszybciej dojedzie po pasażera, albo pojazd, który jest najbliżej.

2.2. Optymalizacja sieci PRT. Efektywność transportowa

Zdefiniujmy problem optymalizacji sieci PRT oraz zagadnienie analizy efektywności transportowej. Problem optymalizacji ruchu w sieci PRT może być sformułowany na dwa sposoby. Po pierwsze, dla zadanej struktury sieci (topologii sieci, liczby dostępnych pojazdów, rozmieszczenia potoków

itp.) zagadnienie polega na wyborze optymalnej trasy przejazdu pojazdu (problem był częściowo analizowany we wstępie), przy czym przez pojęcie optymalnej trasy rozumie się trasę minimalizującą funkcję celu, którą może być czas przejazdu pojazdu.

Drugi problem optymalizacji ruchu w sieci PRT polega na znalezieniu optymalnej konfiguracji wybranych elementów sieci, która maksymalizuje efektywność transportową całego systemu. Przez pojęcie zdolności transportowej sieci PRT rozumie się liczbę pasażerów obsłużonych podczas trwania badania, którzy nie oczekiwali na pojazd dłużej niż 300 s (5 min).

Na potrzeby badań czas podróży pojazdu $T_{podróży}$ został zdefiniowany jako suma teoretycznego czasu przejazdu $T_{referencyjny}$ oraz czasu opóźnienia $\Delta_{opóźnienia}$. Teoretyczny czas przejazdu $T_{referencyjny}$ to najkrótszy możliwy czas podróży pojazdu między dwoma przystankami (końcowym i początkowym), przy założeniu, że na trasie nie ma zatorów, a pojazd porusza się z maksymalną możliwą prędkością (uwzględniając maksymalną dopuszczalną prędkość na segmentach). W tym przypadku przyspieszanie i zwalnianie jest pomijane. Natomiast $\Delta_{opóźnienia}$ to czas oczekiwania na pojazd, opóźnienia spowodowane zatorami na trasie oraz czas potrzebny na przyspieszenie i wyhamowanie.

$$T_{podróży} = T_{referencyjny} + \Delta_{opóźnienia} \quad (3)$$

$$\Delta_{opóźnienia} = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (4)$$

gdzie:

t_1 – czas oczekiwania na pojazd;

t_2 – czas wsiadania i wysiadania z pojazdu;

t_3 – czas przejazdu związany z poruszaniem się z prędkością mniejszą niż dozwolona, wynikającą z zagęszczenia ruchu;

t_4 – czas niezbędny na przyspieszanie i zwalnianie.

Tak zdefiniowana efektywność dobrze odzwierciedla potrzeby pasażerów oraz ma klarowną interpretację fizyczną.

Inną miarą efektywności jest tzw. współczynnik odchylenia czasu przejazdu δ , będący stosunkiem tzw. czasu opóźnienia do czasu referencyjnego

$$\delta = \frac{\Delta_{opóźnienia}}{T_{referencyjny}} \quad (5)$$

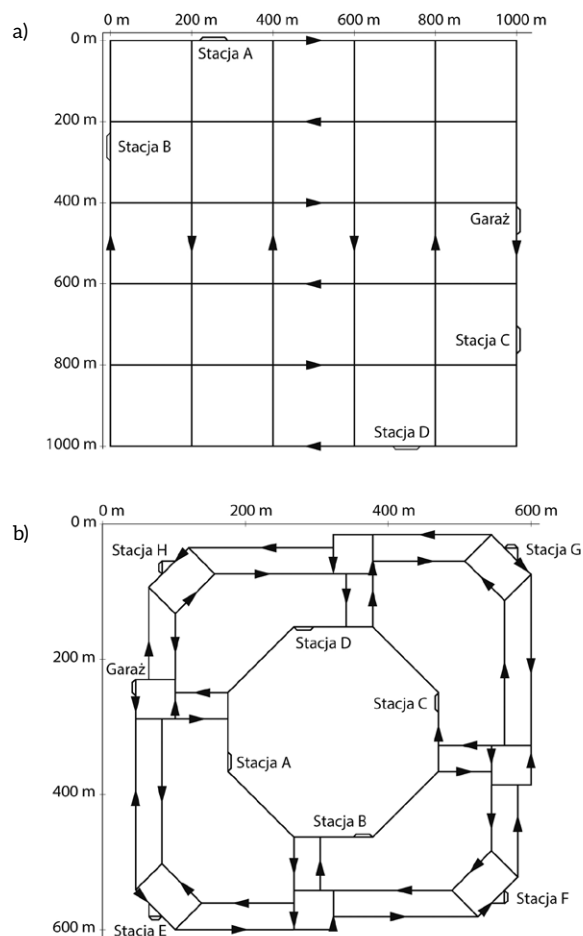
Należy dążyć do minimalizacji tego współczynnika.

Dwie zdefiniowane miary, czyli liczba obsłużonych w jednostce czasu pasażerów, których czas oczekiwania na pojazd nie był dłuższy niż określona jednostka czasu (np. 300 s), oraz współczynnik odchylenia czasu przejazdu, dobrze odzwierciedlają efektywność transportową sieci PRT.

2.3. Przykładowe wyniki symulacji

Przedmiotem analiz były struktury sieci, której schemat zaprezentowano na rys. 10. Publikowane były między innymi w pracach: Choromański i in. 2013 b, Choromański i in. 2013 d, Dyduch 2014.

Założono ciągły napływ pasażerów do wszystkich przystanków. Do wyznaczenia optymalnych dróg oraz sterowania ruchem zastosowano algorytmy opisane w poprzednich rozdziałach. Parametry przyjęte do symulacji przedstawiono w tabeli 1.



Rys. 10. Analizowane struktury sieci PRT1 (a) i PRT2 (b)

Założono, że nie wszystkie pojazdy są wypełnione całkowicie. Wypełnienie pojazdów zdefiniowano jako zmienną losową o rozkładzie prawdopodobieństwa przedstawionym w tabeli 2.

Symulację zrealizowano dla różnych wartości liczby pojazdów w sieci. Wyniki zilustrowano na rys. 11 i 12 oraz ujęto w tabelach 3 i 4. Dla obu rodzajów sieci można znaleźć optymalną liczbę pojazdów, maksymalizującą liczbę przewiezionych pasażerów zgodnie z przyjętymi wcześniej kryteriami. Współczynnik odchylenia czasu przejazdu stale rośnie, co jest niepokojące, lecz charakterystyczne dla sieci relatywnie nierozległych. Należy zaznaczyć, że przykładowych wyników symulacji nie można uogólniać na inne topologie sieci i odmienne potoki pasażerów. Wynika stąd istotny wniosek, że oceny sensowności zastosowania sieci PRT należy dokonywać indywidualnie dla każdego przypadku.

3. Rozwiązanie układu sterowania

Wprawdzie celem niniejszej książki nie jest szczegółowe pokazanie rozwiązania układu sterowania i zarządzania pojazdami PRT, przedstawimy tu jednak pewne rozważania i konkretne rozwiązanie dotyczące systemu PRT opracowanego na Wydziale Transportu Politechniki Warszawskiej pod kierunkiem prof. W. Choromańskiego. Problemy, które tu się pojawiają, są analogiczne do problemów związanych z automatyzacją pojazdów drogowych (samochodów): na ile pojazdy

Tabela 1. Parametry założone w symulacji

Parametr sieci	Wartość parametru dla sieci PRT1	Wartość parametru dla sieci PRT2
Całkowita długość torów	12 km	6 km
Kategoria segmentów torów K_i	K_A , segmenty magistralne	K_A , segmenty magistralne
Maksymalna dozwolona prędkość na segmentach V_{seg_i}	50 km/h	50 km/h
Liczba przystanków p	4	8
Typ przystanków	przystanki proste PP	przystanki proste PP
Liczba miejsc postojowych m_i na przystanku	5	4
Wielkość stref buforowych b_i	8 m	8 m
Liczba dostępnych pojazdów	50	50
Techniczna maksymalna prędkość pojazdów V_{pobj_i}	50 km/h	50 km/h
Maksymalne przyspieszenie pojazdów a_i	2 m/s ²	2 m/s ²
Czas wsiadania i wysiadania pasażerów γ	20 s	20 s
Czas postoju pojazdu na przystanku $t_{postoiu}$	10 min	10 min
Separacja między poruszającymi się pojazdami sep_i	dynamiczna, zależna od prędkości – od 0,5 m do 14 m	dynamiczna, zależna od prędkości – od 0,5 m do 14 m
Wagi cząstkowe	wszystkie wagi równe 1	wszystkie wagi równe 1
Algorytm wyboru najkrótszej drogi	algorytm Dijkstry	algorytm Dijkstry
Wielkość i rozkład potoków pasażerów	rozkład równomierny na wszystkie przystanki w liczbie 1300 os./h na przystanek (5200 os./h w systemie) pasażerowie z równym prawdopodobieństwem wybierają każdy z przystanków docelowych, pojawiają się na przystanku równomiernie w ciągu godziny	rozkład równomierny na wszystkie przystanki w liczbie 1300 os./h na przystanek (5200 os./h w systemie) pasażerowie z równym prawdopodobieństwem wybierają każdy z przystanków docelowych, pojawiają się na przystanku równomiernie w ciągu godziny
Akceptowalny czas oczekiwania pasażerów na pojazd ΔT	300 s (5 min)	300 s (5 min)

Tabela 2. Wypełnienie pojazdów

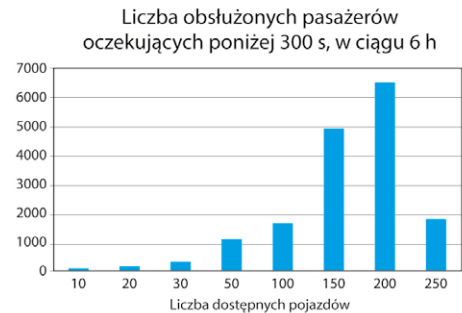
Liczba pasażerów w pojeździe	0	1	2	3	4
Prawdopodobieństwo	0	0	0,1	0,2	0,7

Tabela 3. Wyniki symulacji dla sieci PRT1

Liczba dostępnych pojazdów	Liczba obsłużonych pasażerów poniżej 300 s, w ciągu 6 h	Współczynnik odchylenia czasu przejazdu
10	83	0,26
20	172	0,34
30	332	0,41
50	1146	0,61
100	1682	3,23
150	4947	6,86
200	6522	7,95
250	1840	9,76

Tabela 4. Wyniki symulacji dla sieci PRT2

Liczba dostępnych pojazdów	Liczba obsłużonych pasażerów poniżej 300 s w ciągu 6 h	Współczynnik odchylenia czasu przejazdu
10	189	0,87
20	474	0,90
30	791	1,07
50	1168	2,23
100	1247	4,25
150	953	6,51



Rys. 11. Wykresy wyników symulacji dla sieci PRT1



Rys. 12. Wykresy wyników symulacji dla sieci PRT2

powinny korzystać z układów ulokowanych w sobie, a na ile z układów i informacji pochodzących z infrastruktury. Oba rozwiązania mają wady i zalety. W projekcie opracowanym na Wydziale Transportu PW połączono obydwa systemy, a ogólna struktura została przedstawiona na rys. 13.

System CSS ma informacje o wszystkich aktualnie eksploatowanych pojazdach (położenie, prędkość, docelowe miejsce podróży). Wyznacza on dla każdego pojazdu trasę podróży (modyfikuje ją w każdym węźle sieci PRT). System ten może również określać dopuszczalną aktualną prędkość ruchu. Prędkość tę określa również SP, a zatem są one liczone przez dwa niezależne oprogramowania. SP steruje również przełączaniem pokładowych zwrotnic pojazdu (tzw. *passive switch*), jakkolwiek sterowania dokonuje się na bazie informacji przekazywanych przez CSS. Systemy obszarowe stosowane są przy bardzo rozległych sieciach PRT – wtedy kontrolowana sieć dzielona jest na obszary.

4. Ewolucja systemów PRT

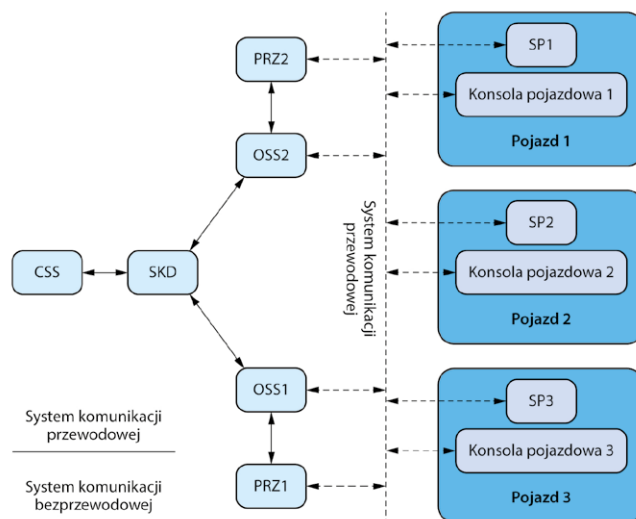
Ewolucja systemów PRT mierza w kilku kierunkach.

- Modyfikacji pojęcia toru prowadzącego pojazd. Tory definiują sieć PRT, która powinna być „gęsta” i redundantna. Tor nie powinien mieć charakteru mechanicznego, a winien być realizowany metodami informatycznymi i telekomunikacyjnymi (np. przy wykorzystaniu technologii SLAM, opisanej w dalszych rozdziałach).
- Pojazd nie powinien poruszać się tylko po wydzielonej dla siebie i tylko dla siebie drodze (w terminologii anglosaskiej to tzw. ROW, *a rights of way*). Powinien umożliwiać poruszanie się po kategoriach ROW A, B i C. Dla kategorii C pojazd PRT współużytkuje drogę z innymi pojazdami.
- System powinien być skalowalny, tzn. umożliwiać ruch po dedykowanej drodze umieszczonej nad powierzchnią ziemi (ROW A), ale również na powierzchni, gdzie współużytkuje drogę z innymi pojazdami.
- Pojazdy powinny być autonomiczne na poziomie L4.

Nie osiągnięto jeszcze takiego poziomu technologii, aby wdrożyć tego rodzaju systemy. Jakkolwiek wydaje się, że zostaną one wprowadzone w ciągu 3–4 lat, znacznie wcześniej niż samochody czy autobusy na poziomie L5.

4.1. Polska propozycja systemu

W Polsce zaproponowany został system HMASSUT Prometheus. Propozycja tego rozszerzenia została opracowana przez prof. W. Choromańskiego (Choromański i Garbarek 2018; Choromański, Garbarek, Kozłowski 2019; Choromański i Garberek 2020). System stanowi istotne rozszerzenie w stosunku do znanego w literaturze systemu PRT, integrując trzy technologie: PRT, pojazdu elektrycznego i pojazdu autonomicznego. System ten składa się z małych, czteroosobowych pojazdów elektrycznych poruszających się autonomicznie po lekkiej nadziemnej infrastrukturze (w trybie autonomicznym i torowym). Pojazdy realizują transport *point to point*, tzn. od przystanku początkowego do końcowego nie ma przystanków pośrednich. Pojazd sam wybiera optymalną trasę podróży. Pojazdy w tym samym trybie mogą się poruszać po drogach, które współużytkują z innymi pojazdami. W tym przypadku również zachowany



Rys. 13. Ogólna struktura sterowania systemem PRT: CSS – Centralny System Sterowania; OSS – Obszarowy System Sterowania; SP – pokładowy (pojazdowy) system sterowania; SKD – System Koncentratora Danych; PRZ 1, 2 – Przystankowe Systemy Sterowania

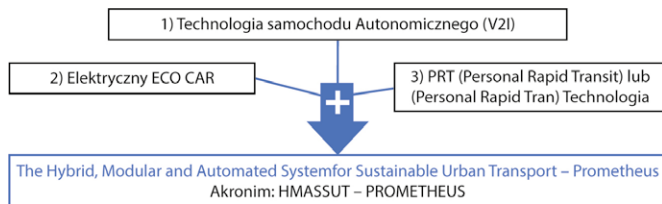
jest tryb autonomiczny (na poziomie L4 jest to tryb jazdy bez kierowcy – pojazd nie jest wyposażony w kierownicę). W tym przypadku pojazd wykorzystuje tor elektroniczny (sygnały elektromagnetyczne generowane z instalacji drogowej) lub (w dalszym rozwoju systemu) tor elektroniczny (tor wyznaczony przez pomiarowy samochód wykorzystujący pomiar radarowy, lidarowy i z kamer). W drugim przypadku system do kierowania pojazdem wykorzystuje technologię maszynowego głębokiego uczenia (z silnym uwzględnieniem sztucznej inteligencji – głębokich sieci neuronowych).

Dalej zostanie przedstawiony skrótowy opis systemu HMASSUT Prometheus. Na rys. 15 przedstawiono w postaci graficznej ideę systemu.

Uzupełnieniem systemu jest samochód elektryczny, dlatego skrótowo zostanie opisana jego konstrukcja. Powstała ona na bazie samochodu elektrycznego opracowanego w ramach projektu „ECO-Mobilność” (realizowanego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka w latach 2007–2016).



Rys. 14. Ilustracja opracowanego już systemu PRT, stanowiącego istotę systemu HMASSUT Prometheus (wraz z preprototypami)



HYBRID – because, referring to the electric drive, it does not eliminate the use of others (CNG, hydrogen fuel drives, fuel cells) – ponieważ nie eliminuje innych systemów niskoemisyjnych (gaz LNG, wodór, akumulatory przepływowe)

MODULAR – because it enables adaptive system design, using all its modules or only some – ponieważ umożliwia „składanie” systemu jak z klocków Lego (można wykorzystać wybrane lub wszystkie moduły systemu)

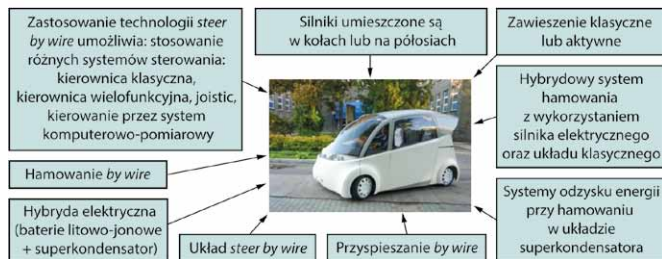
AUTOMATED – because it uses technologies allowing traveling in “driverless” mode – ponieważ umożliwia pracę w modzie driverless



Rys. 15. Ilustracja systemu oraz wizytacja efektów projektu przez komisarzy europejską ds. transportu Violetę Bulc



Eco samochód elektryczny



Rys. 16. Preprototyp samochodu elektrycznego opracowanego przez Politechnikę Warszawską (projekt „ECO-Mobilność”, POIG, kierownik W. Choromański, 2009–2015) wraz ze schematem niektórych funkcjonalności

Aktualnie system wyposażony jest w system automatyzacji identyczny do systemu zainstalowanego w pojazdach PRT poruszających się po jezdni. Tylko tam może poruszać się w trybie *driverless* (bez kierowcy). W pozostałych jest samochodem elektrycznym przystosowanym do przewozu zarówno osób sprawnych, jak i niepełnosprawnych, o ograniczonej mobilności. Opisane systemy mogą być wykorzystane w transporcie miejskim do przewozu ludzi i ładunków oraz do transportu specjalistycznego – medycznego (integrując sieć szpitali czy łącząc np. gminy z jednostkami opieki zdrowotnej w metropoliach). Mogą stanowić transport ekologiczny usytuowany w specjalnych miejscach – parkach narodowych. W zastosowaniach miejskich (dużych metropoliach) będą miały charakter komplementarny do już eksploatowanych masowych systemów,

jak metro (np. dowóz mieszkańców z nowych osiedli do dużych hubów transportowych). Dla mniejszych miast mogą stanowić podstawowy szkielet transportowy. Należy mocno podkreślić dużą uniwersalność i skalowalność systemu.

Literatura

ACHARYA S.R.: *Motorization and urban mobility in developing countries exploring policy options through dynamic simulation*. „Journal of the Eastern Asia Society for Transportation Studies” 2/2005.

ACRP REPORT 37: *Guidebook for Planning and Implementing Automated People Mover Systems at Airports*, Transportation Research Board, Washington 2010.

ANDERSON J.E.: *An Intelligent Transportation Network System*, PRT International, LLC, Minneapolis 2011.

ANDERSON J.E.: *High-Capacity Personal Rapid Transit: Rationale, Attributes, Status, Economics, Benefits*. LLC, Minneapolis 2007.

ANDREASSON I.: *Innovative Transit Systems: Survey of current developments*. VINNOVA Report VR 2001:3, The Swedish Agency for Innovation Systems.

ANDREASSON I.: *Innovativa kollektiva trafiksystem*. KFB-Rapport 2000.

ASCE: *Automated People Mover Standard*. American Society of Civil Engineers, 2013.

ATRA: *Personal Automated Transportation: Status and Potential of Personal Rapid Transit*. Main Report, 2003.

BUCHANAN M., ANDERSON J.E., TEGNER G., FABIAN L., SCHWEIZER J.: *Emerging Personal Rapid Transit Technologies Introduction, State of the Art, Applications*, w: *Proceedings of the conference*, Bologna, Italy 2005.

BURTON E., JENKS M., WILLIAMS K.: *Achieving sustainable urban form*. Routledge 2013.

CHAPMAN H., CHAPMAN M., CEDER A.: *An Architectural Approach to Sustainable Transport Design: SkyCabs Elevated Small Group Automated Rapid Transit (ESGART)*. ATRF 2009 32 Australasian Transport Research Forum, SkyCity Auckland Convention Centre, Auckland, New Zealand 2009.

CHOROMAŃSKI W.: *Personal Rapid Transit – Selected Problems*. WSEAS International Conference, Arcachon, France 2007.

CHOROMAŃSKI W., DYDUCH J., PAŚ J.: *Minimizing the Impact of Electromagnetic Interference Affecting the Control System of Personal Rapid Transit in the Context of the Competitiveness of the Supply Chain* [w:] *Archives of Transport*. Polish Academy of Sciences, t. 23, z. 2, Warszawa 2011.

CHOROMAŃSKI W., DYDUCH J., PAŚ J.: *Zapobieganie zakłóceniom w liniach zasilania i układach zasilających system PRT*. „Logistyka” 3/2011.

CHOROMAŃSKI W., DYDUCH J., PAŚ J.: *Zapobieganie zakłóceniom w liniach zasilania i układach zasilających system PRT*, VIII Konferencja Naukowo-Techniczna LogiTrans, Szczyrk 2011.

Fragment pochodzi z książki:
Pojazdy autonomiczne i systemy transportu autonomicznego,
 W. Choromański, I. Grabarek, M. Kozłowski, M. Czerepicki, K. Marczuk,
 Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2020