

CHOROMAŃSKI Włodzimierz¹
DYDUCH Jarosław²
BRACH Paweł³

BADANIA SYMULACYJNE RUCHU INNOWACYJNEGO SYSTEMU TRANSPORTOWEGO PRT

Przedmiotem referatu jest analiza systemu transportowego PRT (Personal Rapid Transit). Składa on się z małych pojazdów (pojemność 3-5 pasażerów) poruszających się po lekkiej infrastrukturze torowej. Pojazdy realizują transport „door-to-door” tzn. poruszają się od przystanku początkowego do końcowego bez przystanków pośrednich. Ruch ich jest całkowicie zautomatyzowany tzn. pojazdy nie posiadają kierowców. W ramach projektu ECO-Mobilność (projekt realizowany jest w ramach Programu Innowacyjna Gospodarka – Działanie nr 1) prowadzone są kompleksowe prace dotyczące tego właśnie transportu. W referacie rozważania zostaną skupione na analizie efektywności tego systemu z punktu widzenia realizacji zadania transportowego. W pracy zaprezentowany zostanie model opracowany model badań symulacyjnych oraz przykładowe wyniki badań.

SIMULATION STUDIES OF THE INNOVATIVE TRANSPORT SYSTEM PRT

The subject of this paper is the analysis of transport system PRT (Personal Rapid Transport). It consists of small carts (capacity of 3 to 5 passengers) that move on a light-weighted rail infrastructure. The carts move in 'door-to-door' mode, which means that they travel from the origin to destination without intermediate stops. Complex studies of that kind of transportation are being conducted as a part of an ECO-mobility project (which is a part of the Innovative Economy Program - Operation no. 1). The paper focuses on the analysis of the transport efficiency of that kind of transportation, understood as an ability to realize specific transportation tasks. The article describes the implemented simulation model and exemplary results of tests.

¹ Politechnika Warszawska, Wydział Transportu, 00-662, Warszawa, ul. Koszykowa 75, tel. +48 234-54-09

² slavyp1@gmail.com

³ Uniwersytet Warszawski, Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Warszawa, ul. Stefana Banacha 2, wch@it.pw.edu.pl

1. WSTĘP

Przedmiotem referatu jest analiza systemu transportowego PRT (Personal Rapid Transit). System PRT należy do systemów APM (Automated People Movers). Składa on się z małych pojazdów (pojemność ok. 3-5 pasażerów) poruszających się po lekkiej infrastrukturze torowej umiejscowionej 4-5 metrów nad powierzchnią ziemi. Pojazdy realizują transport „door-to-door” tzn. poruszają się od przystanku początkowego do końcowego bez przystanków pośrednich. Ruch ich jest całkowicie zautomatyzowany tzn. pojazdy nie posiadają kierowców.

W ramach projektu ECO-Mobilność (projekt realizowany jest w ramach Programu Innowacyjna Gospodarka – Działanie nr 1) prowadzone są kompleksowe prace dotyczące tego właśnie transportu. W referacie rozważania zostaną skupione na analizie efektywności tego systemu z punktu widzenia realizacji zadania transportowego. Ta analiza jest niezwykle istotna zwłaszcza, że systemy PRT rozważane są jako alternatywne systemy transportu ludzi w aglomeracjach miejskich prace dotyczące systemu transportowego Personal Rapid Transport (PRT). Analiza jest dość złożona i realizowana jest z wykorzystaniem technik symulacji komputerowej. Wymaga między innymi określenia topologii sieci, algorytmów sterowania pojazdami, definicji potoków pasażerów itd. Analiza wyników badań przeprowadzonych przy pomocy zaawansowanego narzędzia informatycznego pozwoli odpowiedzieć na pytanie jaką ilość pasażerów są w stanie obsłużyć różne ilości pojazdów.

2. PODSTAWOWE ZAŁOŻENIA PRZYJĘTE DO BUDOWY MODELU SYMULACYJNEGO

W trakcie budowy modelu nominalnego zostały przyjęte poniższe założenia, które umożliwiły precyzyjnie odwzorować fizyczną sieć PRT:

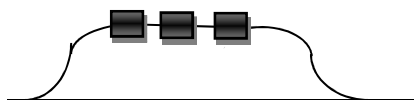
- Pozycja każdego pojazdu jest zawsze precyzyjnie określona. System sterowania ruchem w każdym momencie ma dostęp do tej informacji i może ją wykorzystać do wyznaczenia drogi lub kierowania pojazdem.
- Wszystkie szlaki komunikacyjne są jednokierunkowe, tzn. nie ma możliwości kolizji pojazdów jadących w przeciwnym kierunku.
- Pojazdy nie mogą poruszać się do tyłu.
- Wagon PRT może jechać tylko w jedno miejsce, tzn. ze stacji A do stacji B. Nie ma możliwości wybrania drogi wielo-przystankowej, tzn. ze stacji A do stacji B, a następnie do stacji C.

2.1 Charakterystyka elementów sieci

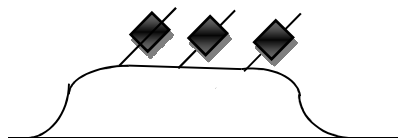
Pojazdy PRT mają określoną pojemność P , prędkość maksymalną V_{max} , prędkość chwilową V oraz cel podróży. Pojazd może, na żądanie pasażera/pasażerów, przejechać ze stacji A do stacji B. Poza tym, w sytuacji, gdy na przystankach nie ma pasażerów wagon może samoistnie pojechać do garażu.

Pasażerowie pojawiają się na stacji i wybierają cel podróży. Do czasu przyjazdu pojazdu pasażerowie oczekują na stacji. Po dotarciu do celu podróży pasażerowie znikają z systemu. Pasażerowie pojawiają się na przystanku zgodnie z wcześniej określonym rozkładem (normalny, jednostajny, gamma, itp.) Każdy pasażer potrzebuje określonego czasu wejścia do pojazdu, tzn. wejście do pojazdu nie jest natychmiastowe, trwa np. 15 sekund.

Przystanki mają określoną pojemność P , stan wypełnienia W , ilość pasażerów na peronie N oraz ilość pasażerów oczekujących na przyjazd pojazdu N_{cz} . Istnieją dwa typy przystanków - przystanek prosty, na który pojazdy wjeżdżają i wyjeżdżają zgodnie z zasadami kolejki FIFO oraz przystanek złożony, na którym są zatoki dla pojazdów i pojazdy mogą wyjeżdżać w innej kolejności niż wjechały.



Rys. 1 Schemat przystanku prostego



Rys 2. Schemat przystanku złożonego

Garáže służą do przechowywania pojazdów nie będących w użyciu w danej chwili. Mają określoną pojemność P oraz stan wypełnienia W . W odróżnieniu od przystanków garaże nie mają określonej budowy - pojazdy po prostu do nich wjeżdżają i z nich wyjeżdżają.

Szlaki komunikacyjne to odcinki łączące stacje, garaże oraz skrzyżowania. Każdy szlak komunikacyjny jest jednokierunkowy i ma określoną maksymalną dozwoloną prędkość V_{max} . Na każdym odcinku można określić minimalną separację, którą muszą zachować pojazdy między sobą.

Skrzyżowania to miejsca, w których przecinają się szlaki komunikacyjne. Skrzyżowania mogą mieć maksymalnie dwa wjazdy i dwa wyjazdy. Określenie pierwszeństwa na skrzyżowaniu odbywa się na podstawie wagi każdego pojazdu - pojazd z wyższą wagą ma pierwszeństwo przejazdu. Wagę pojazdu określa się na podstawie poniższego wzoru:

$$W(p) = W_t \times t + W_d \times d + W_p \times p + W_{pas} \times pas \quad (1)$$

gdzie:

$W(p)$ - waga pojazdu

W_t - cząstkowa waga czasu oczekiwania

t - czas oczekiwania

W_d - cząstkowa waga priorytetu szlaku komunikacyjnego, na którym znajduje się pojazd

d - priorytet szlaku komunikacyjnego, na którym znajduje się pojazd

W_p - cząstkowa waga priorytet pojazdu

p - priorytet pojazdu

W_{pas} - cząstkowa waga ilości pasażerów w pojeździe

pas - ilość pasażerów w pojeździe

3. OPIS MODELU SYMULACYJNEGO

Symulator ruchu pojazdów posługuje się modelem w postaci złożonego automatu komórkowego. Automaty komórkowe są to struktury opisane są przez siatkę komórek oraz ich stany, przejścia i reguły tych przejść. Automaty w takiej postaci są modelami matematycznymi, które tworzą środowisko dla większych dyskretnych klas modeli, ponieważ wszystkie opisujące je struktury przyjmują wartości dyskretne.

Każdy prosty automat komórkowy składa się z n -wymiarowej regularnej, dyskretnej siatki komórek, każda komórka jest taka sama (jest kopią poprzedniej), cała przestrzeń siatki musi być zajmowana w całości przez komórki ułożone obok siebie. Każda z nich posiada jeden stan ze skończonego zbioru stanów. Ewolucja każdej komórki przebiega według tych samych ściśle określonych reguł lokalnych (jednorodność), które zależą wyłącznie od poprzedniego stanu komórki oraz od stanów skończonej ilości komórek - sąsiadów. Ewolucja następuje w dyskretnych przedziałach czasowych, jednocześnie dla każdej komórki (równoległość). W automacie komórkowym komórka jest automatem skończonym.

Dla problemu symulowania ruchu PRT wykonana została adaptacja automatów komórkowych do bardziej złożonej struktury, jaką jest graf skierowany, reprezentujący infrastrukturę.

Model obliczeniowy jest grafem skierowanym, w którym węzłami są węzły komunikacyjne, natomiast krawędziami są odcinki szlaki komunikacyjne. W każdym węźle oraz krawędzi utrzymywane są wszystkie parametry, związane z danym elementem (takie jak długość odcinka drogi, kierunek jazdy, opis skrzyżowania, itp.). Z każdą krawędzią związany jest dyskretny model drogi, który jest reprezentowany przez tablicę jednowymiarową. Jedna komórka odpowiada zadanej jednostce drogi i jest parametrem modelu (wszystkie pozostałe parametry m.in. prędkość są reprezentowane w odniesieniu do tej jednostki, np. liczba komórek / jednostkę czasu).

Każde skrzyżowanie, jest reprezentowane, jako jedna komórka. Podczas symulacji należy zadbać, aby w danej jednostce czasu w ustalonej komórce modelu, znajdował się co najwyżej jeden pojazd. Komórka może znajdować w dokładnie jednym z dwóch stanów:

może być pusta albo może znajdować się w niej pojazd. Każdy pojazd w modelu, porusza się z prędkością całkowitą z przedziału $0 \dots V_{\max}$.

3.1 Ewolucja automatu komórkowego

Po ustaleniu i zdefiniowaniu wszystkich elementów składowych automatu komórkowego można przejść do nakładania reguł na siatkę, czyli aktualizowania jej.

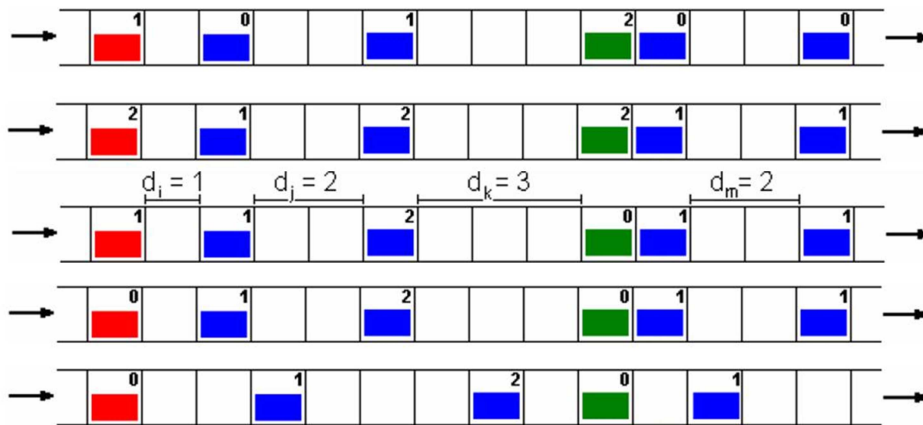
Cały proces ewolucji automatu można podzielić na kilka części:

1. Stan początkowy – jest to, wspomniane już, ustalenie warunków początkowych. Zwykle są to stany neutralne niepowodujące konfliktów w automacie.
2. Aktualizacja siatki automatu – w każdej iteracji każda z komórek automatu przechodzi przez poniższą sekwencję instrukcji:
 - a. Sprawdzenie reguł przejść – w tym kroku sprawdzany jest aktualny stan komórki, stany komórek sąsiednich jak i inne parametry automatu;
 - b. Sprawdzanie sąsiedztwa – bada się, czy któraś z komórek sąsiednich nie wchodzi w stan konfliktu. Jeżeli takie konflikty zaczynają występować, to należy wyeliminować wszystkie istniejące konflikty, według ustalonych wcześniej reguł dla takich przypadków;
 - c. Sprawdzanie warunków brzegowych – sprawdzane tu są komórki które są na krawędziach siatki. Usuwa się je gdy są zbędne (sąsiedztwo zamknięte pochłaniające) lub tworzy nowe (sąsiedztwo periodyczne);
 - d. Sprawdzenie ilości iteracji – jeśli jest to automat o skończonym, z góry określonym cyklu życiowym, to w tym kroku sprawdzamy czy może nastąpić koniec ewolucji. Czasami sprawdza się również w tym miejscu czy automat zmienił swój stan i czy przeszedł do stanu stabilnego i nic w nim się już nie zmieni w kolejnych krokach iteracji.
3. Zwiększenie licznika iteracji i przejście do kroku 2.a.

W przypadku sieci PRT aktualizacja konfiguracji modelu składa się z następujących kroków (każdy wykonywany jest równoległe dla wszystkich pojazdów w układzie):

- Przyśpieszenie: jeśli prędkość pojazdu v , jest mniejsza od prędkości maksymalnej (ustalonej dla pojazdu, bądź na odcinku drogi) oraz jeśli dystans do kolejnego pojazdu jest większy niż $v+1$ komórek, wówczas zwiększ prędkość o 1 jednostkę, czyli wykonaj $v := v + 1$,
- Zwolnienie: jeśli pojazd z pozycji i , jadący z prędkością v , widzi inny pojazd na pozycji $i+j$, dla j mniejszych bądź równych v , wówczas zredukuj prędkość do $j-1$, czyli wykonaj $v := j-1$,
- Randomizacja (opcjonalne): z prawdopodobieństwem $p1$, prędkość pojazdu jest zmniejszana o 1 (o ile jest ona większa od zera), czyli $v := v - 1$,
- Randomizacja (opcjonalne): z prawdopodobieństwem $p2$, pojazd ulega awarii na J jednostek czasu (prędkość pojazdu jest ustawiana na 0 przez J jednostek czasu),
- Jeśli w kolejnej jednostce czasu pojazd przejeżdża przez skrzyżowanie, sprawdź następujące warunki:

- a. jeśli nie ma konfliktu na skrzyżowaniu, tzn. inny pojazd z innego kierunku nie będzie w tym samym czasie przejeżdżał przez skrzyżowanie, nic nie robi,
 - b. w p.p. ustal kolejność pojazdów (jeśli nie ma na skrzyżowaniu sygnalizacji świetlnej, ustąp pierwszeństwa pojazdowi z prawej strony, jeśli jest sygnalizacja, decyduje zielone światło). Pojazd z pierwszeństwem przejazdu nic nie robi (przejeżdża normalnie), pojazdy które muszą ustąpić, zwalniają i czekają przed skrzyżowaniem.
- Ruch: przenieś pojazdy o v komórek w kierunku jazdy.



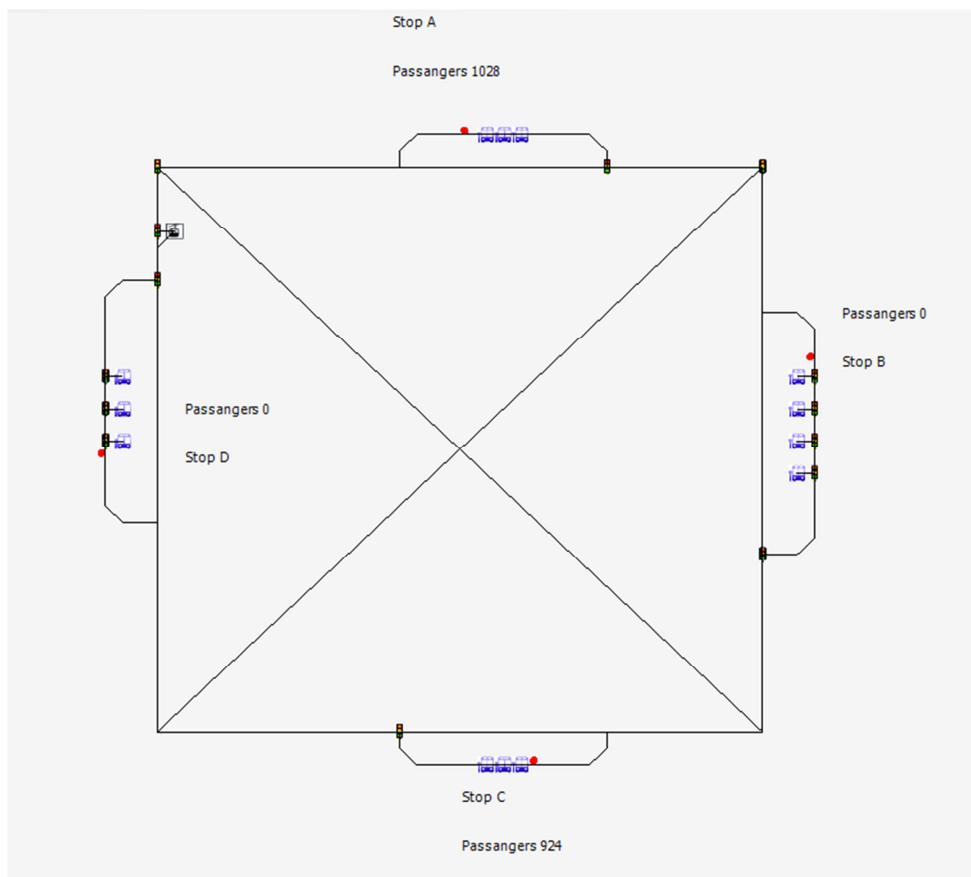
Rys 3. Model symulacji ruchu w sieci PRT

3.2 Uzasadnienie wyboru modelu

Na podstawie analizy publikacji naukowych i literatury, można zdecydowanie stwierdzić, że automaty komórkowe z bardzo elementarnymi regułami modelują nietrywialnie zdarzenia jakie mają miejsce w rzeczywistym ruchu pojazdów. W kroku pierwszym, modelujemy naturalne zachowanie pojazdu, w sytuacji, w której możemy bezpiecznie zwiększyć prędkość. W kolejnym kroku, dbamy o zachowanie bezpiecznej odległości do poprzedzającego pojazdu. Kroki 3 i 4 zostały oznaczone jako opcjonalne. Tego typu zachowania pojazdów będą przedmiotem symulacji i późniejszej analizy pod kątem dostosowania modelu do sytuacji, które obserwujemy w rzeczywistości.

4. PRZYKŁADOWE WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Do wykonania eksperymentu została wykorzystana mapa z 4 przystankami A, B, C i D.



Rys. 4 Mapa topologii sieci wykorzystanej w eksperymencie

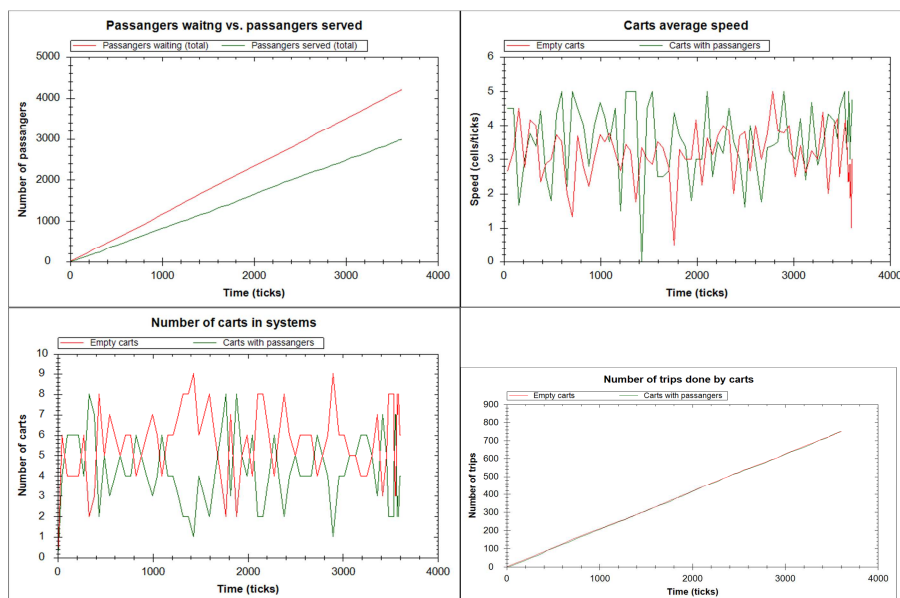
Na potrzeby eksperymentu na przystankach A i C typu FIFO zostały podłączone nieskończone strumienie pasażerów. W każdej sekundzie na przystanku A pojawia się pasażer, który chce jechać na przystanek C oraz na przystanku C pojawia się pasażer który chce jechać na przystanek A.

Zostały przeprowadzone następujące symulacje:

- A. 10 pojazdów w systemie z $v_{\max} = 10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$
- B. 30 pojazdów w systemie z parametrami j/w
- C. 100 pojazdów w systemie z parametrami j/w
- D. 200 pojazdów w systemie z parametrami j/w
- E. 500 pojazdów w systemie z parametrami j/w

Powyższe eksperymenty symulowały 1h rzeczywistego ruchu pojazdów. Interesowała nas m.in. liczba pasażerów jaką obsłużyliśmy w ciągu 1h oraz ilość wykonanych przejazdów.

Wyniki eksperymentu A są przedstawione na poniższych wykresach:



Rys. 5 Wyniki eksperymentu A

W **eksperymentcie A** 10 pojazdów zdołało obsłużyć ponad 4000 pasażerów w ciągu jednej godziny i wykonało około 700 przejazdów z pasażerami oraz około 700 przejazdów bez pasażerów. W trakcie eksperymentu wszystkie pojazdy były cały czas w sieci.

W **eksperymentcie B** 30 pojazdów zdołało obsłużyć ponad 5500 pasażerów w ciągu jednej godziny i wykonało około 1500 przejazdów z pasażerami i około 1400 przejazdów bez pasażerów. W trakcie eksperymentu wszystkie pojazdy były cały czas w sieci.

W **eksperymentcie C** 100 pojazdów zdołało obsłużyć ponad 5500 pasażerów w ciągu jednej godziny i wykonało około 1600 przejazdów z pasażerami i około 1500 przejazdów bez pasażerów. W trakcie eksperymentu w sieci znajdowało się od 20 do 90 pojazdów (pozostałe czekały w garażu).

W **eksperymentcie D** 200 pojazdów zdołało obsłużyć ponad 4900 pasażerów w ciągu jednej godziny i wykonało około 1600 przejazdów z pasażerami i około 1500 przejazdów bez pasażerów. W trakcie eksperymentu w sieci znajdowało się od 20 do 90 pojazdów (pozostałe czekały w garażu).

W **eksperymentcie E** 500 pojazdów zdołało obsłużyć ponad 4900 pasażerów w ciągu jednej godziny i wykonało około 1600 przejazdów z pasażerami i około 1500 przejazdów bez pasażerów. W trakcie eksperymentu w sieci znajdowało się od 20 do 90 pojazdów (pozostałe czekały w garażu).

5. WNIOSKI

W referacie zaprezentowano, według wiedzy, jeden z pierwszych modeli symulacyjnych ruchu pojazdów PRT. Modele takie mają kluczowe znaczenie w analizie przydatności zastosowania tego typu transportu do wdrożenia i rozwiązania konkretnych problemów transportowych na danych obszarze. Automaty komórkowe, reguły budowy symulacyjnej struktury sieci PRT, reguły pierwszeństwa na skrzyżowaniach, reguły zarządzania ruchem, to oryginalne osiągnięcia Autorów. Praca wdrożona zostanie do sterowania ruchem eksperymentalnej sieci PRT wykonywanej w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka

Praca wykonywana jest w ramach programu operacyjnego Innowacyjna Gospodarka współfinansowanego z Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego : Projekt „ECO-Mobilność” koordynowany przez Prof. nzw dr hab. Włodzimierza Choromańskiego



**INNOVATIVE
ECONOMY**
NATIONAL COHESION STRATEGY

EUROPEAN UNION
EUROPEAN REGIONAL
DEVELOPMENT FUND



6. BIBLIOGRAFIA

- [1] Jack H. Irving: *Fundamentals of Personal Rapid Transport*, Lexington, 1978
- [2] J. Edward Anderson: *High-Capacity Personal Rapid Transit: Rationale, Attributes, Status, Economics, Benefits*, 2007
- [3] Taxi 2000 Corporation: *Skyweb Express Feasibility Study, Results Summary*, 2007