

KISIELEWSKI Piotr¹

Wybrane problemy optymalizacyjne strategicznego planowania w komunikacji miejskiej

WSTĘP

Publiczna komunikacja pasażerska stanowi podstawowy system transportowy w dużych aglomeracjach miejskich. Dobre funkcjonowanie masowej komunikacji pasażerskiej wpływa na wizerunek regionu, zadowolenie mieszkańców i odwiedzających, sprawne funkcjonowanie całej aglomeracji. Funkcjonowanie komunikacji pasażerskiej zależy od wielu czynników m.in. stanu infrastruktury komunikacyjnej, technicznego stanu taboru oraz w zasadniczym stopniu od zarządzania i planowania transportu.

Proces transportowy w miastach jest na tyle złożony, że wymaga planowania z wykorzystaniem nowoczesnej metodyki badań operacyjnych i matematycznej optymalizacji.

Proces planowania transportu pasażerskiego można podzielić na tzw. planowanie strategiczne i planowanie operacyjne [7,8,14,15].

Planowanie strategiczne związane jest z globalną organizacją transportu w regionie i podlega zwykle decyzji lokalnego samorządu lub jego organu w postaci zarządu transportu.

Planowanie strategiczne (*ang. Strategic Planning*) obejmuje trzy etapy przedstawione na rysunku 1:

- Projektowanie sieci komunikacyjnej (Network Design)
- Planowanie linii komunikacyjnych (Line Planning)
- Planowanie rozkładów jazdy (Timetabling)

Kolejne trzy etapy stanowi tzw. planowanie operacyjne (*ang. Operational Planning*):

- Planowanie zadań pojazdów (Vehicle Scheduling)
- Planowanie służb kierowców (Duty Scheduling)
- Harmonogramowanie pracy kierowców (Crew Rostering)

Planowanie operacyjne pozostaje w zakresie operatorów komunikacji tj. firm lokalnej komunikacji miejskiej.

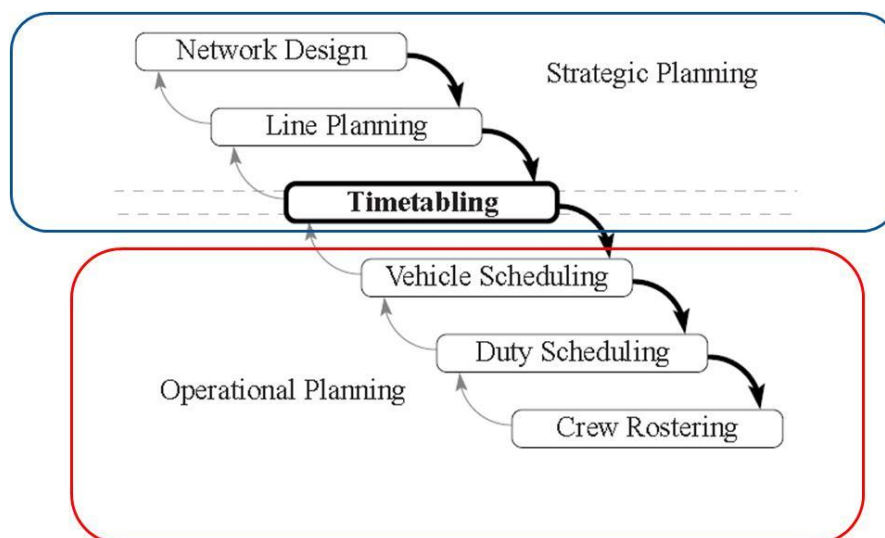
Praca ma na celu przedstawienie wybranych problemów planowania strategicznego, głównie pod kątem wspomaganie komputerowego z wykorzystaniem metod optymalizacyjnych. Zaprezentowano skrótowo modele matematyczne: elementy grafów, funkcje celu i ograniczenia optymalizacji. Wskazano możliwości rozwiązania z wykorzystaniem nowoczesnych algorytmów obliczeniowych, bez szczegółowej analizy problemów. W podsumowaniu sformułowano wnioski pod kątem wykorzystania rozwiązań w praktycznych implementacjach inżynierskich.

1 PROJEKTOWANIE SIECI KOMUNIKACYJNEJ

Projektowanie sieci komunikacyjnej odbywa się na podstawie istniejącej i planowanej infrastruktury komunikacyjnej tj. sieci dróg miejskich, przystanków, terminali transportowych oraz rozmieszczenia osiedli mieszkaniowych, obiektów publicznych, centrów administracji, szkół, obiektów przemysłowych.

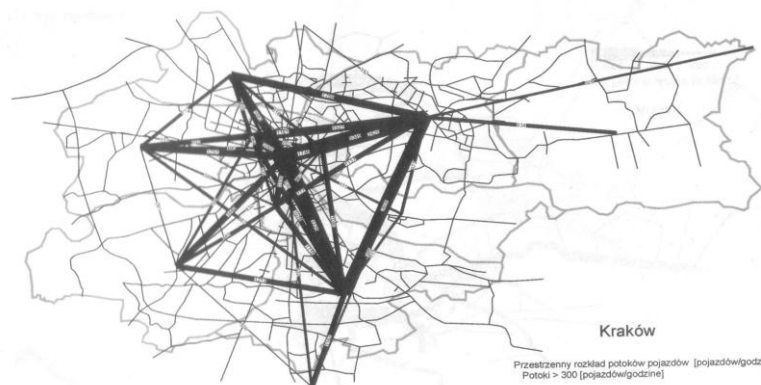
Podstawą planowania sieci komunikacyjnej jest rozpoznanie potrzeb migracyjnych ludności celem stworzenia macierzy migracji czy też więzby ruchu pasażerskiego w regionie. Służą temu badania

¹ Politechnika Krakowska, Zakład Systemów Logistycznych, 31-864 Kraków, Al. Jana Pawła II nr 37, piotrk@mech.pk.edu.pl



Rys. 1. Schemat modułowy systemu planowania transportu pasażerskiego

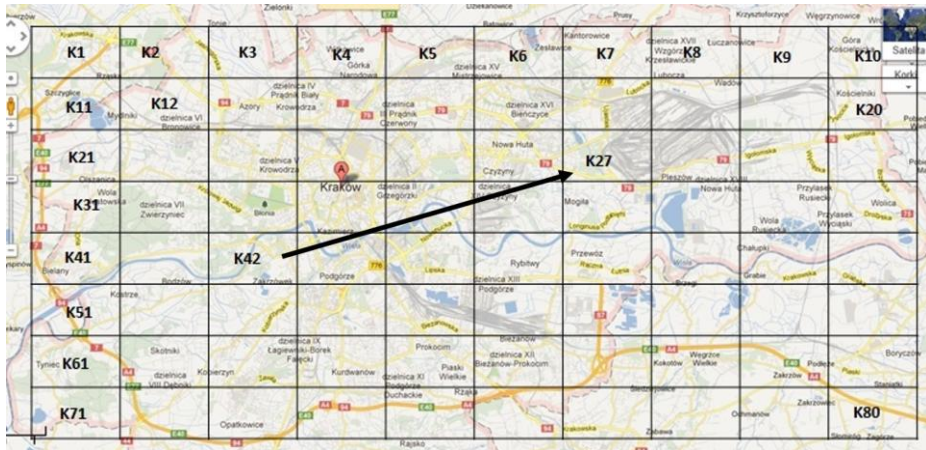
ankietowe i pomiary potoków ruchu pasażerskiego [6]. Na ich podstawie tworzona jest najczęściej tzw. więźba ruchu wewnętrznego, której przykład przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przykład więźby ruch wewnętrznej w mieście [6]

Więźba odzwierciedla potoki ruchu w ilościach pasażerów lub pojazdów w jednostce czasu pomiędzy wybranymi rejonami miasta. Podział miasta na rejony może być dokonany na umownej siatce ponumerowanych kwadratów jak na rysunku 3. Dysponując dokładnymi danymi można stworzyć dokładniejszą od więźby ruchu, macierz podróży wewnętrznych (migracji), w ilości pasażerów na godzinę (lub dobę), jak na rysunku 4 [7,8,10]. Na tej podstawie z wykorzystaniem dokładnego topograficznego podkładu mapowego ustala się tzw. „szkielet” sieci komunikacyjnej tj. graf odzwierciedlający połączenia międzyprzystankowe i rozłożenie przystanków pasażerskich, jak na rysunku 6.

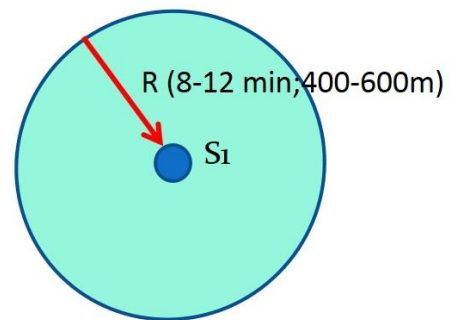
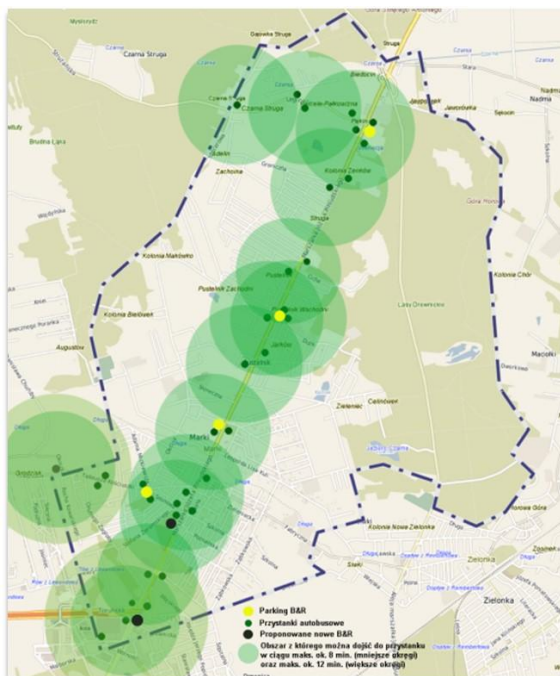
Plan linii komunikacyjnych i przystanków powinien odpowiadać rozłożeniu potoków ruchu pasażerskiego i pokrycia komunikacyjnego miasta z uwzględnieniem czasów dojścia do przystanków. Szacuje się, że pasażer akceptuje dystans dojścia do przystanku w granicach 400-600 m tj. przy średnim czasie ok. 8-12 minut. Przyjąć należy, że większy dystans nie jest dla pasażerów akceptowalny. Promień $R=400\text{m}$ wyznacza nominalny obszar pokrycia komunikacyjnego wokół przystanku charakterystyczny dla centrów miast, a promień 600m powiększony obszar pokrycia dopuszczalny dla przedmieść i rejonów podmiejskich.



Rys. 3. Podział miasta na rejon

	K1	K2	K3	K4	K5	...	...	K79	K80
K1	0	0,8	2,0	1,6	2,2	...	...	0,9	1,0
K2	1,2	0	1,5	2,1	0,7	...	...	1,6	2,0
K3	2,3	1,5	0	0,6	1,7	...	...	1,0	1,7
K4	2,0	2,3	0,8	0	2,2	...	...	1,4	1,8
K5	2,5	0,9	1,9	3,0	0	...	...	1,0	1,3
...	...	...	...	...	...	0	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...	0	...	...
K79	0,9	1,7	1,3	1,6	1,8	...	...	0	2,0
K80	1,1	2,2	1,8	1,9	1,6	...	...	2,4	0

Rys. 4. Przykład macierzy podróży wewnętrznych w mieście (w setkach pasażerów/godzinę)



Rys. 5. Pokrycie komunikacyjne obszaru [7,8]

Obwiednia sumy obszarów pokrycia wokół wszystkich przystanków aglomeracji wyznacza obszar pokrycia komunikacyjnego, jak w przykładzie na rysunku 5. Obszar nominalny zaznaczono kolorem ciemniejszym, powiększony jaśniejszym.

- b) przebieg pojazdów na liniach, czyli tzw. wozokilometry, oraz
 c) ogólną liczbę kursów na liniach,

Z uwagi na jakość obsługi pasażera, uwzględnia się w ogólności następujące kryteria:

- a) średni czas opóźnienia kursu,
 b) średni kwadrat czasu opóźnienia kursu,
 c) średni względny czas opóźnienia kursu,
 d) średni kwadrat względnego czasu opóźnienia kursu,
 e) maksymalny czas kursu,
 f) liczba linii komunikacyjnych.

W praktyce szuka się kompromisowego rozwiązania, łącząc w wielokryterialną funkcję celu wybrane kryteria grupy pierwszej i drugiej z odpowiednio dobranymi wagami. W planowaniu strategicznym najczęściej przyjmuje się jako kryterium: czas pracy pojazdów, liczbę linii komunikacyjnych, średni czas opóźnienia kursu i średni kwadrat czasu opóźnienia kursu. Na etapie planowania linii nie jest jeszcze określona liczba kursów na liniach, stąd w analizie przyjmuje się jeden kurs na linię. Dyskusję stopnia ważności wszystkich kryteriów można znaleźć w pracy [17].

Funkcję celu do planowania linii, podlegającą minimalizacji, można sformułować następująco:

$$G(x) = \alpha_1 \sum_{l \in L} \sum_{i \in B} \sum_{j \in B} t_{ij} x_{ij}^l + \alpha_2 L + \frac{\alpha_3}{R} \sum_{r \in R} (T^r - t_{r^+r^-}) + \frac{\alpha_4}{R} \sum_{r \in R} (T^r - t_{r^+r^-})^2 \quad (1)$$

gdzie:

x_{ij}^l – binarna zmienna decyzyjna, $x_{ij}^l = 1$ jeśli linia l biegnie bezpośrednio z przystanku i do j , w przeciwnym przypadku $x_{ij}^l = 0$

α_i – wagi dla kryteriów składowych

t_{ij} – czas jazdy na odcinku $i-j$

T^r – rozkładowy czas kursu r

$t_{r^+r^-}$ – czas bezpośredni jazdy z przystanku początkowego r^+ do przystanku końcowego kursu r^-

R – liczba kursów w dniu na wszystkich liniach

L – liczba wszystkich linii komunikacyjnych

Zbiory R , B , L – oznaczają odpowiednio zbiory kursów rozkładowych, przystanków i linii.

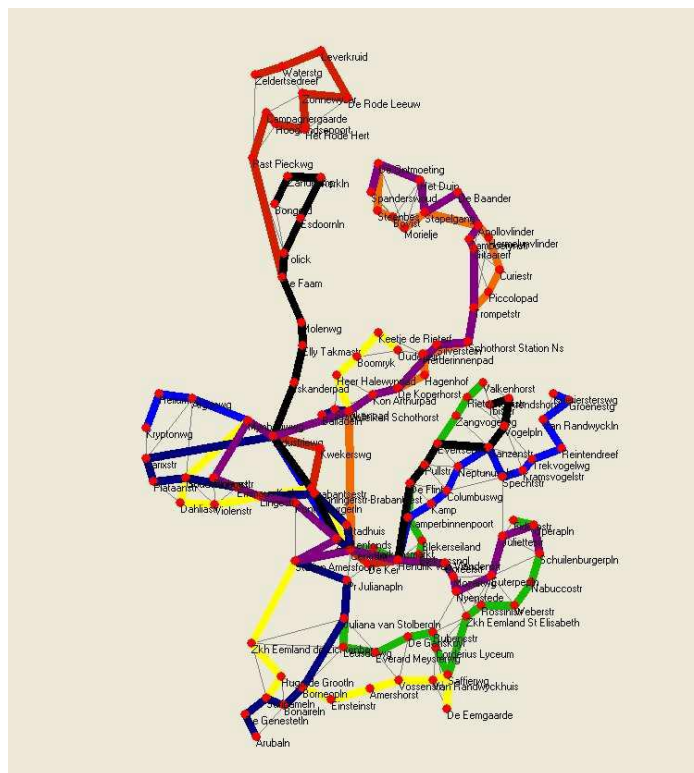
W ograniczeniach dla funkcji optymalizacji (1) należy przyjąć, że:

- przystanek na linii może pojawiać się tylko raz,
- każda linia ma tyle samo przyjazdów co odjazdów z danego przystanku,
- każda linie obejmuje nieprzerwaną trasę tj. linia nie jest podzielona.

Jednostka miary funkcji $G(x)$ ustalana jest przez dobór wymiarów wag α_i . Niedogodnością funkcji celu postaci (1) jest brak normalizacji kryteriów składowych do jednego przedziału wartości np. (0,1), co wiąże się z trudnością doboru wartości wag α_i , stąd zalecana jest normalizacja kryteriów.

Przebieg algorytmu heurystycznego LSCM (*Line Set Construction Method*) [17] tworzącego optymalny układ linii komunikacyjnych na podstawie (1) obejmują opisane poniżej punkty:

- krok 1: konstrukcja pierwotnej sieci komunikacyjnej tj. w postaci grafu spójnego, „bez wysp”, łącząc przystanki z sąsiadami, możliwie najkrótszymi czasowo krawędziami.
- krok 2: generacja pierwszej propozycji linii częściowych, W tym etapie kreowana jest duża liczba linii częściowych, niekoniecznie dobrych, których selekcja następuje w kolejnym etapie. Linie na tym etapie pokrywają wszystkie przystanki, choć nie jest to warunek konieczny.
- krok 3: wybór linii głównych, Wybór następuje w wyniku selekcji linii częściowych wg kryteriów: sumarycznego czasu pracy na liniach, liczby linii i średniego czasu opóźnienia kursu.
- krok 4: połączenie linii głównych w kompletne linie komunikacyjne.
- krok 5: post-procesing, w którym następuje ustalenie globalnej sieci linii, m.in. włączenie niepokrytych dotąd przystanków i eliminacja „podwójnych” przystanków. Zasadą jest że, przystanek na każdej linii pojawia się tylko raz.



Rys. 7. Optymalny układ linii autobusowych [17]

Na rysunku 7 przedstawiono optymalny układ linii autobusowych, otrzymany w wyniku algorytmu LSCM dla sieci komunikacyjnej z przykładu na rysunku 6. W tabeli 1 zestawiono wyniki kryteriów cząstkowych dla planu zastanego (rzeczywistego) i planu optymalnego (LSCM). O dobrej zbieżności algorytmu LSCM świadczą bardzo zbliżone wyniki dla algorytmu Pape [16].

Tab. 1. Zestawienie porównawcze planu linii autobusowych [16]

	Plan zastany	Plan optymalny LSCM
Czas jazdy na liniach dziennie	14:00:49	10:20:01
Liczba linii	20	16
Średni czas opóźnienia kursu (min)	14:03	11:22
Średni kwadrat czasu opóźnienia kursu (min ²)	406,5	299,7

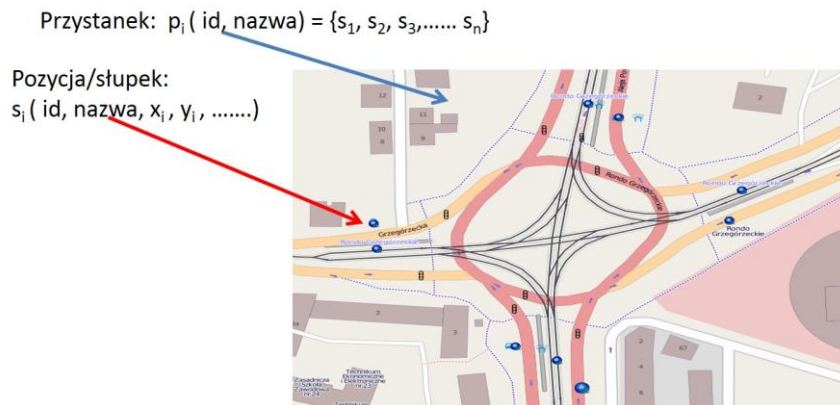
Poprawa zastanego układu komunikacyjnego linii jest znaczna wg wszystkich kryteriów cząstkowych, co predysponuje zastosowane algorytmy do praktycznych implementacji.

3 MODELOWANIE SIECI KOMUNIKACYJNEJ

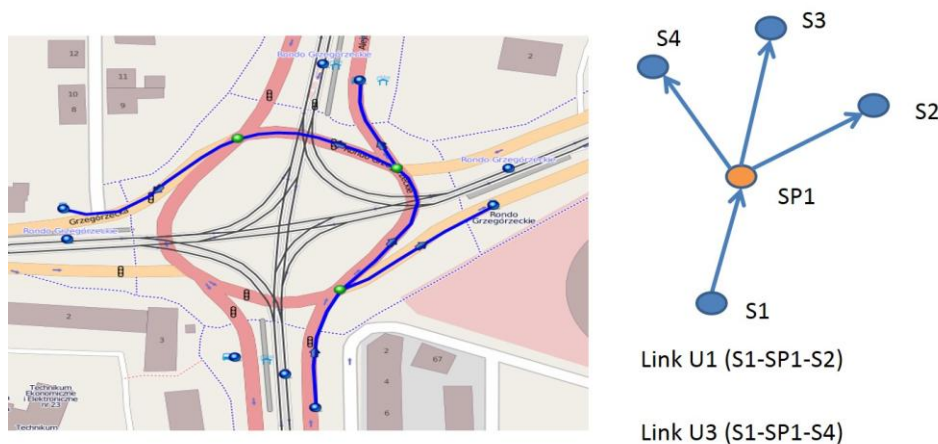
Modelowanie sieci transportowych dokonuje się zwykle z wykorzystaniem liniowej teorii grafów. Specyfika zagadnienia wymaga wprowadzenia szczegółowych definicji modelowanych elementów i stosowania różnych grafów dla tej samej sieci komunikacyjnej w zależności od celu np. modelowania ruchu pojazdów czy modelowania połączeń komunikacyjnych dla pasażerów [10].

Na etapie modelowania pierwotnej sieci tj. szkieletu połączeń komunikacyjnych, stosuje się proste grafy, jak na rysunku 6, w których węzły reprezentują przystanki. Taka reprezentacja grafu nie jest wystarczająca na etapie projektowania rozkładów jazdy, gdzie przystanek p_i stanowi zbiór słupków s_i tj. pozycji topograficznych, przy których zatrzymują się pojazdy, o przykładowej topologii jak na rysunku 8. W takim modelu krawędzie grafu zwane z angielskiego „linkami” są skierowane i odpowiadają trajektorii ruchu pojazdów pomiędzy słupkami, jak na rysunku 9. Ponieważ różne linki, mogą we fragmentach pokrywać się, w grafie uwzględnia się słupki „wirtualne” i podział linków na

linki składowe. Topologię sieci zaproponowaną przez autora zastosowano w pakiecie komputerowym *cityLineDesigner*®.



Rys. 8. Topologia przystanku komunikacyjnego



Rys. 9. Topologia sieci komunikacyjnej do modelowania rozkładu jazdy.

Szerzej modelowanie sieci komunikacji miejskiej przedstawiono m.in. w [1,10,14,15,18].

4 PROJEKTOWANIE ROZKŁADU JAZDY

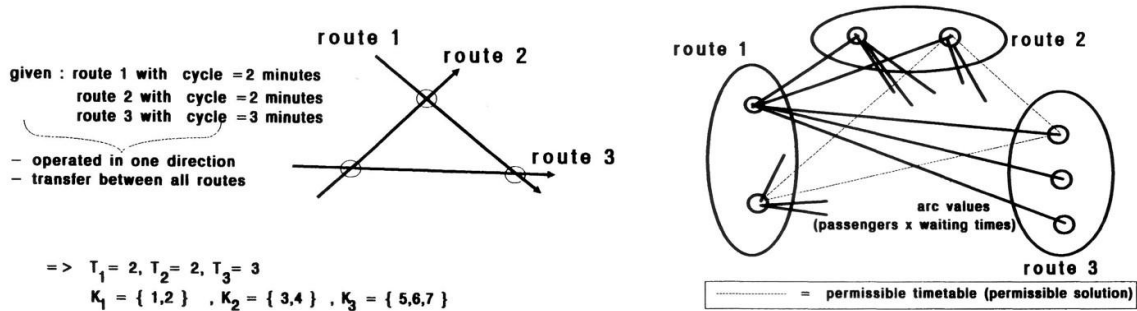
W trzecim etapie planowania strategicznego, na bazie tras linii i przystanków konstruowany jest rozkład jazdy, czyli szczegółowy plan kursowania pojazdów na liniach, z odnotowaniem czasów odjazdów pojazdów ze wszystkich przystanków pasażerskich. Ten etap składa się z dwóch kolejnych faz. W pierwszej fazie na podstawie prognozowanych potoków pasażerów, więźby ruchu, macierzy migracji, ustala się częstotliwość kursowania pojazdów, która może być różna na różnych liniach i zmienna lub stała w zależności od pory dnia. Szczegółowe rozważania w tym zakresie można znaleźć w [3,14,17]. Trudniejszy i ciekawszy problem obejmuje faza druga, w której następuje optymalny dobór czasu rozpoczęcia każdego kursu pojazdu. W tym zakresie stosuje się trzy różne modele matematyczne.

Pierwszy model QSAP (*Quadratic Semi-Assignment Problem*) [13,15,17], zakłada stały odstęp kursów, który może być różny na różnych liniach i stanowi specyficzny problem (kwadratowego) przydziału, schematycznie przedstawiony na rysunku 10.

Zakładamy, że dany jest zbiór linii komunikacyjnych $L = \{1, \dots, m\}$, zbiór czasów odjazdów kursów $D = \{1, \dots, n\}$, oraz macierze kosztów $[c_{ijk}]$.

Każda macierz kosztów $[c_{ijk}]$ określona jest dla danego przystanku czasem oczekiwania pasażerów na połączenie przesiadkowe. Czas ten może być mnożony jest przez liczbę oczekujących pasażerów, jeśli średnia szacunkowa liczba pasażerów o danej porze dnia na przystanku danej linii jest znana.

Binarne zmienne decyzyjne w modelu QSAP określone są następująco:



Rys. 10. Model QSAP [13]

$$x_{ih} = \begin{cases} 1 & \text{jeśli czas odjazdu kursu } h \in D \text{ jest przypisany do linii } i \in L \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

przy warunku:

$$\sum_{h=1}^n x_{ih} = 1 \quad \text{dla } i = 1, \dots, m$$

Funkcja celu optymalizacji, podlegająca minimalizacji, w modelu QSAP może być sformułowana następująco:

$$Z(x) = \sum_{i=1}^m \sum_{h=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n c_{ihjk} x_{ih} x_{jk} \quad (2)$$

W rozwiązaniu zadania (2) stosowane są z powodzeniem różne algorytmy metaheurystyczne, genetyczne i ewolucyjne [7]. Trudność w określeniu macierzy $[c_{ihjk}]$, oraz minimalizacja czasu oczekiwania pasażerów prowadząca do niekorzystnego grupowania pojazdów na przystankach i wspólnych odcinkach tras jest wadą metod opartych na modelu QSAP.

Drugi model MIP – programowania całkowitoliczbowego (*Mix Integer Programming*), [4,5,14,15] zakłada możliwość zmiennego odstępu kursów na tej samej linii.

W tym modelu czasy startu kursów na liniach dobierane są tak, aby uzyskać synchronizację (węzłową) przyjazdu pojazdów różnych linii na przystanki przesiadkowe. Synchroniczny przyjazd, oznacza pojawienie się pojazdu na przystanku w takim przedziale czasowym w stosunku do drugiego pojazdu aby zapewniony był dogodny transfer pasażerów, co pokazano schematycznie na rysunku 11.

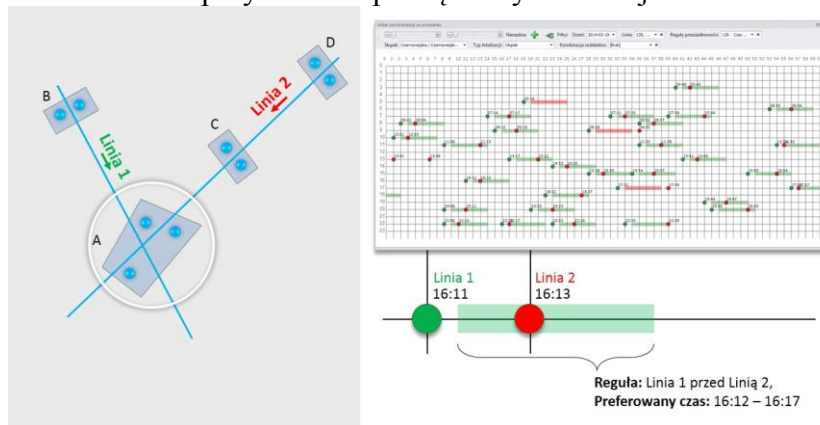
W modelu MIP poszukujemy maksymalnej liczby zsynchronizowanych przyjazdów dla całej sieci, w całym rozpatrywanym przedziale czasowym:

$$Z(x) = \sum_i \sum_j \sum_k y_{ijk} \quad (3)$$

Sumowanie we wzorze (3) odbywa się po wszystkich liniach, kursach i przystankach, a zmienne y_{ijk} przyjmują wartości:

$$Y_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{dla synchronicznego przyjazdu kursów na przystanek,} \\ 0 & \text{w przeciwnym przypadku.} \end{cases}$$

Zmienne y_{ijk} przyjmują wartości zależne od zmiennych decyzyjnych x_{ij} określonych czasem (w minutach) odjazdów kursów z przystanków początkowych każdej linii.



Rys. 11. Synchronizacja węzłowa - schemat

Korzystną cechą modelu (3) jest, że odpowiedni dobór parametrów synchronizacji umożliwia jednocześnie zapewnienie synchronizacji węzłowej i liniowej (interwałowej) [7,8]. Do rozwiązania zadania (3) z powodzeniem stosowane są algorytmy heurystyczne [4,5,16,17] i ewolucyjne [7]. Inny matematyczny model optymalizacji rozkładu jazdy zaproponowano w pracy [15]. Proponowane algorytmy optymalizacji [4,5,7,8,15,16,17] znalazły praktyczne zastosowanie w specjalistycznych, komercyjnych pakietach oprogramowania np. *Hastus*[®], *IVU-Plan*[®], *Lumiplan*[®], *cityLineDesigner*[®].

PODSUMOWANIE

Planowanie w każdym z wymienionych etapów planowania strategicznego stanowi w istocie, z uwagi na postać funkcji celu, liczbę zmiennych i ograniczeń, NP trudny problem optymalizacyjny rozwiązywany z pomocą różnorodnych, nowoczesnych algorytmów i metod optymalizacyjnych. Planowanie ręczne bazujące wyłącznie na doświadczeniu planisty jest bardzo trudne i czasochłonne, a efekty zazwyczaj dalekie od optimum. Wyniki badań naukowych świadczą, że zastosowanie zaawansowanych metod optymalizacyjnych przynosi bardzo dobre rozwiązania, uzyskiwane w wielokrotnie krótszym czasie. Im większe rozmiary aglomeracji miejskiej i systemu komunikacji, tym problem planowania strategicznego jest trudniejszy. Dla średnich i dużych aglomeracji miejskich zastosowanie komputerowego wspomaganie specjalistycznymi algorytmami optymalizacyjnymi staje się nieodzowne dla uzyskania rozwiązań dogodnych dla pasażerów przy akceptowalnych kosztach transportu.

Streszczenie

W pracy omówiono proces planowania strategicznego w komunikacji miejskiej. Przedstawiono w kolejności i pokrótce scharakteryzowano poszczególne etapy procesu tj. projektowanie globalnej sieci, planowanie linii komunikacyjnych i rozkładów jazdy. Przytoczono zasadnicze pozycje światowej literatury odnoszące się do procesu. Niezbędne dane do procesu planowania stanowią wyniki pomiarów potoków pasażerskich i ankietyzacji, przedstawiane w postaci więzby ruchu i macierzy migracji. W skrócie przedstawiono również modelowanie miejskiej sieci komunikacyjnej z wykorzystaniem teorii grafów. W pracy zaprezentowano modele matematyczne optymalizacji, funkcje celu, zmienne decyzyjne i ograniczenia, zastosowane w algorytmach komputerowego wspomaganie procesu planowania. Funkcja celu na każdym etapie uwzględnia kompromis pomiędzy komfortem pasażerów i kosztem organizacji transportu. Przedstawiono przykłady i wnioski pod kątem wykorzystania w praktycznych implementacjach.

Selected optimization problems of strategic planning in city public transit

Abstract

In the paper the process of strategic planning in city transit has been described. Specific stages of the process, that is global network design, line planning and timetabling have been presented in turn and characterized. The worldwide basic references concerning the process have been denoted. Necessary data to

planning process are taken from passenger flow measurements and questionnaires, presented in a form of passenger journey chart and migration matrix. Modeling of city transit network with the use of graph theory has been also briefly presented. Mathematical models of optimization, objective functions, decision variables and constraints applied in the algorithms of computer aided planning process have been described in the paper. The objective function at each stage of the process takes into account the compromise between the passenger comfort and the operational cost of transport. The examples and conclusions regarding practical implementations have been presented.

BIBLIOGRAFIA

1. Ahuja R., Mohring R., Zaroliagis C., Robust and Online Large-Scale Optimization: Models and Techniques for Transportation Systems. Springer-Verlag, Berlin 2009.
2. Ceder A., Designing public transport network and routes. Advanced Modeling for Transit Operations and Service Planning. Lam W.H.K., Bell G.H., Emerald Group Publishing Ltd., UK, pp. 59-91, 2003.
3. Ceder A, O. Tal, Timetable synchronization for buses, Computer-Aided Transit Scheduling, Proceedings of the Seventh International Workshop on Computer-Aided Scheduling of Public Transport, Cambridge, MA, USA, pp. 245{258, 1997.
4. Eranki A., A model to create bus timetables to attain maximum synchronization considering waiting times at transfer stops. Graduate School Theses and Dissertations. University of South Florida, 2004.
5. Gaca S., Suchorzewski W., Tracz M., Inżynieria ruchu drogowego, Teoria i praktyka. WKŁ, Warszawa 2009.
6. Grzyb A., Kisielewski P., Problemy optymalizacyjne strategicznego planowania transportu pasażerskiego. Optymalizacja i CAD, Politechnika Koszalińska, 2014.
7. Kisielewski P., Logistic Planning in City Public Transit. 2nd International Conference on „IT Solutions in Logistics”, Łomża, Poland 2014.
8. Kisielewski P., Operational planning in city public transit. Simulation in research and development, XXI Scientific Workshop, Polish Society of Computer Simulation, Białystok-Białowieża, 2014.
9. Kisielewski P., Modeling of transport networks with graph theory. Simulation in research and development, XX Scientific Workshop, Polish Society of Computer Simulation, Koszalin-Mielno, 2013.
10. Kisielewski P.: City transit logistics system with optimization module. XXX Conference Polioptimization and CAD, Koszalin University of Technology, Mielno 2012.
11. Kisielewski P., Planning and dispatching optimization of city transport. Conference of IGKM, Białystok 2012.
12. Klemm W.D., Stemme W., Schedule Synchronization for Public Transit Networks. Daduna J.R., Wren A., Computer-Aided Transit Scheduling, Springer-Verlag Berlin-Heidelberg 1988.
13. Lam W., Bell M., Advanced modeling for transit operations and service planning. Pergamon, 2003.
14. Liebchen C., Periodic Timetable Optimization in Public Transport. Technische Universität. Dissertations, Berlin 2006.
15. Pape U., Reinecke E., Reinecke Y., Entwurf und Implementierung eines Linienplanungssystems für den Busverkehr im ÖPNV unter einer objektorientierten grafischen Entwicklungsumgebung, Gruppendifplomarbeit, Technische Universität Berlin, 1992.
16. Quak C.B., A passenger-oriented approach of the construction of a global line network and an efficient timetable. Delft University of Technology 2003.
17. Wilson N., Nuzzolo A., Schedule-Based Dynamic Transit Modeling: Theory and Applications. Kluwer Academic Publishers 2010.