

Marzenna Dębowska-Mróz, Andrzej Rogowski

Optymalizacja transportu publicznego

JEL: R42. DOI: 10.24136/atest.2019.221.

Data zgłoszenia: 29.01.2020. Data akceptacji: 10.02.2020.

W artykule omówiony został problem optymalizacji transportu publicznego. Zdefiniowano typowe zagadnienia związane z optymalizacją transportu publicznego, w szczególności: etapy planowania sieci transportu publicznego, sposób opisu sieci transportowej, konstruowanie funkcji celu, synchronizacji rozkładów jazdy, klasyfikacji węzłów sieci, metody rozwiązania zadania.

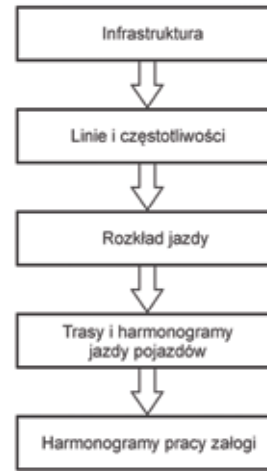
Słowa kluczowe: transport publiczny, rozkład jazdy, sieć transportowa, funkcja celu.

Wstęp

Współczesne miasta to nie tylko przestrzeń urbanistyczna, ale przede wszystkim przestrzeń życia mieszkańców realizujących zróżnicowane potrzeby społeczno-gospodarcze. Istotnym elementem tej przestrzeni są systemy transportowe, które często muszą sprostać zróżnicowanym oczekiwaniom dotyczącym realizowanych przemieszczeń oraz towarzyszącym im problemom i utrudnieniom wynikającym z występowania dużych natężeń ruchu drogowego [8]. Podmioty odpowiedzialne za funkcjonowanie systemów transportowych w miastach najczęściej koncentrują swoje działania wokół modernizacji, rozbudowy infrastruktury transportu drogowego, sterowania ruchem (np. sygnalizacją świetlną [27]), których celem jest zapewnienie odpowiedniej przepustowości dróg i ulic. Konsekwencją tych przedsięwzięć jest niestety rosnąca liczba przemieszczeń realizowanych samochodem osobowym, który służy najczęściej osobie kierującej pojazdem, co prowadzi do powstawania kongestii ruchu, która w praktyce prowadzi do zatrzymania ruchu w godzinach szczytu [9].

Jedną z metod ograniczenia kongestii ruchu w miastach jest administracyjne wyłączenie lub istotne ograniczenie ruchu kołowego przynajmniej w centrach miast. Wiązać się to jednak musi z budową efektywnego systemu komunikacji miejskiej i budową infrastruktury umożliwiającej wygodne i bezpieczne podróże piesze i rowerowe. Podróże piesze i rowerowe również jako część podróży łączonych.

„Proces planowania strategicznego w transporcie publicznym i kolejowym, tj. długo- i średnioterminowe projektowanie infrastruktury i poziomu usług sieci transportowej, dzieli się zazwyczaj na następujące po sobie etapy: projektowanie sieci, planowanie linii i rozkładu jazdy. (...) Wszystkie etapy planowania strategicznego są generalnie oparte na tzw. danych o miejscu pochodzenia w postaci OD-matrycy [*origin-destination*]; każdy wpis w OD-matrycy podaje liczbę pasażerów, którzy chcą podróżować z jednego punktu sieci do innego punktu w określonym horyzoncie czasowym. Powszechnie wiadomo, że takie dane mają pewne braki. Na przykład OD-matryce zależą od zastosowanej dyskretyzacji, są wysoce zagregowane, dają tylko punktowy obraz, są one ważne tylko wtedy, gdy zapotrzebowanie na transport jest stałe i nie zależy od poziomu usług lub ceny, a często jest wątpliwe, jak dobrze te dane reprezentują rzeczywiste zapotrzebowanie na transport” [1, s. 123]. Schöbel [22], [23] i Ceder [6] dodają do tego jeszcze rozkład jazdy pojazdów (*vehicle scheduling*) i harmonogramy



Rys. 1. Etapy planowania w transporcie publicznym w ich klasycznym porządku [21]

pracy załogi (*crew schedules*, rys. 1). „Celem tych prac jest rozwiązanie problemu związanego z rozkładem jazdy pojazdu, przy jednoczesnym uwzględnieniu związku między charakterystyką każdej podróży (miejska, peryferyjna, międzymiastowa itp.) a typem pojazdu wymagany dla danej podróży” [6, Abstract].

Początkowo większość modeli planowania komunikacji publicznej dotyczyła jednego z ww. etapów lub sekwencyjnego ich rozwiązywania [zob. 23]. Przyjmowano również jedną funkcję kryterium, np. koszt budowy, koszty eksploatacyjne (*operating cost*), maksymalizacja podróży bezpośrednich, czas podróży (*travel times*). Następnie tworzono modele uwzględniające jednocześnie kilka etapów (np. [22], [16], [10]). Uwzględniano również kilka kryteriów optymalizacji, zwykle jako funkcja ważona kryteriów „częstkowych” (np. [1], [2]) lub znajdując rozwiązania Pareto-optymalne. W modelach tych zwykle zakładano, że infrastruktura jest znana, a modele (i optymalizacja) dotyczą „kombinacji” pozostałych wymienionych aspektów. Jeszcze inne podejście proponują Michaelis i Schöbel [16]. Ponieważ „wadą tej kolejności (tzn. projektowania w kolejności: linii, rozkładu jazdy pojazdów i harmonogramów pracy załóg) jest to, że główne czynniki kosztów (tj. liczba potrzebnych pojazdów i kierowców) są określane dopiero na późnym etapie procesu planowania, sugerujemy zmianę kolejności klasycznej kolejności etapów planowania: w naszym nowym podejściu najpierw projektujemy trasy pojazdów, następnie dzielimy je na linie, a następnie obliczamy (okresowy) rozkład jazdy. Zaletą takiego podejścia jest to, że koszty mogą być kontrolowane podczas całego procesu, podczas gdy cel we wszystkich trzech etapach jest zorientowany na klienta” [16, Abstract].

Innym ze sposobów zwiększenia efektywności komunikacji publicznej jest synchronizacja rozkładów jazdy, przy czym wyróżniamy dwa rodzaje synchronizacji komunikacji miejskiej:

- ♦ synchronizacja interwałowa;
- ♦ synchronizacja przesiadkowa.

Opis sieci transportowej

Budowa modelu optymalizacyjnego – m.in. liczba i charakter zmiennych i parametrów, liczba i charakter równań (warunków

ograniczających), liczba, zakres i postać danych – zależą od bardzo wielu czynników, m.in. od:

- ♦ celu modelowania;
- ♦ szczegółowości modelu;
- ♦ typów środków transportu (komunikacja autobusowa, tramwajowa, kolej, metro);
- ♦ uwzględnienia (bądź nie) multimodalności;
- ♦ kryteriów optymalizacji;
- ♦ możliwości uzyskania wiarygodnych danych do modelu;
- ♦ przewidywanego sposobu uzyskania rozwiązania;
- ♦ postaci rozwiązania;
- ♦ przewidywanych sposobów weryfikacji modelu.

Jednak praktycznie w każdym modelu dotyczącym modelowania (optymalizacji) transportu publicznego istnieje konieczność opisanie sieci transportowej – oczywiście szczegółowość i zakres opisu zależą od wskazanych wyżej czynników. Typowy opis sieci obejmuje (podajemy, wzorując się na opisie z [2]):

1. multigraf $G = (V, E)$, który ma na celu modelowanie topologii sieci transportowej (zakłada się, że jest to graf spójny). Graf ten może być grafem skierowanym lub nieskierowanym. Węzły (wierzchołki) grafu G reprezentują przystanki, stacje, terminale (punkty początkowe i końcowe linii), krawędzie/łuki multigrafu G odpowiadają fizycznym połączeniom transportowym pomiędzy np. dwiema stacjami, przystankami itp. Zwykle z krawędziami, w przypadku modelowania multimodalnego, powiązane są środki (rodzaje) transportu, np. autobus, tramwaj, pociąg, ruch pieszy. Oznacza to, że dla każdego środka transportu możemy utworzyć podgraf zdefiniowany przez krawędzie powiązane z danym środkiem transportu (i węzły incydentne z tymi krawędziami). Wśród wierzchołków grafu G , dla każdego środka transportu, wyróżnia się wierzchołki, w których linie środków transportu mogą się zaczynać, kończyć lub zmieniać kierunek (nazywane są terminalami). Linia środka transportu jest ścieżką nieskierowaną w podgrafie odpowiadającym (indukowanym) środkowi transportu, rozpoczynającą się i kończącą w terminalu (zwykle zakłada się, że linie nie zawierają cykli);
2. OD-macierz. W wersji „pełnej” jest to macierz kwadratowa (może być symetryczna) $n \times n$, gdzie n to liczba węzłów grafu G . Element d_{st} OD-macierzy oznacza nieujemne zapotrzebowanie ze strony pasażerów na podróż z węzła s do węzła t . Nie wszystkie elementy OD-macierzy muszą być dodatnie. Dla każdej pary węzłów (zwykle jest sens dla par o niezerowym zapotrzebowaniu transportowym d_{st}) można wyznaczyć ścieżkę (skierowaną) rozpoczynającą się w węźle s , a kończącą się w węźle t (nazywaną ścieżką pasażerską). Na ogół przyjmuje się, że ścieżki pasażerskie nie zawierają cykli;
3. parametry (wagi) opisujące krawędzie i węzły sieci transportowej. Należą do nich:
 - a) dla krawędzi (dla każdego środka (typu) transportu):
 - czas przejazdu; może być uzależniony od okresu kursowania (pora dnia, roku, określony dzień – roboczy, święto, itp.);
 - przepustowość;
 - częstotliwość;
 - pojemność;
 - koszt (operacyjny);
 - koszt utrzymania (linii).
 - b) dla węzłów:
 - przepustowość;
 - czas przejścia, dojścia (dla węzłów przesiadkowych).

Należy pamiętać, że – w zależności od modelu (przyjętych założeń – głównie kryteriów optymalizacji) – to, co w jednym modelu

traktowane jest jako dane wejściowe (np. linie, przystanki, przepustowość), w innych modelach może być rozwiązaniem zadania optymalizacyjnego. Ponadto mogą występować inne ograniczenia.

2. Kryteria optymalizacji – funkcje celu

W literaturze przedmiotu można wyróżnić dwa podejścia do modeli ze względu na kryteria optymalizacji:

- ♦ modele zorientowane na pasażera;
 - ♦ modele zorientowane na operatora.
- Spośród wielu możliwych kryteriów optymalizacji do najczęściej wykorzystywanych należą:
- ♦ minimalizacja kosztów operatora, w tym minimalizacja dopłat przez jednostki samorządu;
 - ♦ minimalizacja wielkości floty;
 - ♦ maksymalizacja przepustowości;
 - ♦ minimalizacja czasów oczekiwania i podróży pasażerów;
 - ♦ minimalizacja liczby znanych przesiadek;
 - ♦ maksymalizacja liczby podróży bezpośrednich;
 - ♦ minimalizacja czasu przesiadek (łącznie, średniego czasu przesiadki dla pasażera lub maksymalnego czasu przesiadki dla pasażera);
 - ♦ minimalizacja czasu jazdy;
 - ♦ minimalizacja czasu podróży;
 - ♦ przydział środków transportu;
 - ♦ maksymalizacja dostępności czasowej i przestrzennej;
 - ♦ maksymalizacja odporności sieci na „zakłócenia losowe”, rozumiana jako zdolność do realizacji planowych zadań przewozowych, w szczególności rozkładu jazdy i planowych przesiadek (modelowanie stochastyczne);
 - ♦ minimalizacja liczby linii.

Postać funkcji celu w sposób istotny uzależniona jest od konstrukcji modelu i przyjętych kryteriów optymalizacji – nie musi wprost odzwierciedlać przyjętego kryterium optymalizacji. Należy pamiętać, że w przypadku optymalizacji wielokryterialnej (poza np. Pareto-optymalnością) jednym z istotnych podejść jest konstruowanie funkcji celu jako funkcji (najczęściej liniowej) funkcji celów konstruowanych dla poszczególnych kryteriów optymalizacyjnych (np. jest funkcją ważoną). W takich przypadkach często, ze względu na nieporównywalność, wprowadza się zmienne sztuczne, niemające interpretacji fizycznej.

Spośród zadań optymalizacyjnych (różnych kryteriów optymalizacyjnych) w transporcie publicznym szczególnie znaczenia ma tzw. synchronizacja komunikacji miejskiej, tym bardziej, że z reguły odnoszą się one do istniejącej rzeczywistej sieci transportu miejskiego.

- Wyróżniamy dwa rodzaje synchronizacji komunikacji miejskiej:
- ♦ synchronizacja interwałowa;
 - ♦ synchronizacja przesiadkowa.

Synchronizacja interwałowa – dotyczy głównie miejskiej komunikacji autobusowej i tramwajowej (np. [26], [20]) i polega na wyrównaniu interwałów czasowych między każdymi dwoma kolejnymi kursami biegnącymi w tym samym kierunku, gdy pomiędzy dwoma węzłami sieci istnieje kilka alternatywnych linii. Jest oczywiste, że istnieją różne kryteria pozwalające ocenić stopień wyrównania interwałów.

Synchronizacja przesiadkowa dotyczy zarówno komunikacji wykorzystującej jeden środek transportu, jak i wiele różnych środków transportu (autobus, tramwaj, kolej, metro). Rozpatrywana jest w wielu aspektach, w zależności od przyjętych kryteriów i stopnia szczegółowości modelu. W klasycznej postaci celem synchronizacji przesiadkowej jest minimalizacji łącznych czasów

oczekiwania na przesiadkę wszystkich pasażerów we wszystkich węzłach przesiadkowych. W innym przypadku polega na maksymalizacji liczby jednoczesnych przyjazdów pojazdów transportu zbiorowego, co umożliwi również maksymalizację liczby (pożądanych) przesiadek. Niekiedy dodatkowo rozpatruje się unikanie tzw. „jazdy stadami” autobusów po wspólnych fragmentach tras komunikacyjnych. Gdy przeprowadzana jest synchronizacja transportu autobusowego i kolejowego, kryterium optymalizacji stanowi z jednej strony maksymalne wykorzystanie zdolności przewozowej linii kolejowej, a z drugiej minimalizację czasu oczekiwania na przesiadkę. Spośród dość bogatej literatury światowej dotyczącej różnych postaci synchronizacji przesiadkowej wymienimy tu (według daty publikacji): [7, 14, 5, 19, 17, 29, 31, 28, 12, 13].

3. Metody rozwiązania

Metoda uzyskania rozwiązania postawionego problemu optymalizacyjnego zależy od wielu czynników, przede wszystkim od:

- ♦ charakteru zmiennych decyzyjnych;
- ♦ postaci i liczby funkcji celu;
- ♦ liczby i postaci warunków ograniczających;
- ♦ żądanej dokładności rozwiązania;
- ♦ wielkości i charakteru danych wejściowych (ciągłe, dyskretne, deterministyczne, mające charakter losowy).

W większości proponowanych modeli zmienne decyzyjne są zmiennymi dyskretnymi, funkcje celu są funkcjami liniowymi (lub sprowadzalnymi do liniowych), warunki ograniczające są liniowe. W takim przypadku możliwe jest wykorzystanie metod programowania liniowego – np. simplex, metoda generowania kolumn, metoda podziału i ograniczeń². Uzyskane rozwiązanie jest rozwiązaniem dokładnym – optymalnym w sensie teorii optymalizacji. Wykorzystanie metody „przeglądu zupełnego”, nawet dla małych zadań (mała liczba zmiennych decyzyjnych i mało liczne zbiory wartości dopuszczalnych), jest w praktyce niewykonalne ze względu na czas obliczeń, który nawet przy dzisiejszej technice obliczeniowej może przekraczać długość życia człowieka (otrzymujemy rozwiązanie dokładne). Innym sposobem jest osłabienie ograniczeń polegające na zamianie części lub wszystkich zmiennych decyzyjnych z dyskretnych na ciągłe i rozwiązanie powstałego problemu – zwykle nie jest rozwiązaniem optymalnym pierwotnego problemu optymalizacyjnego. W tej sytuacji powstaje pytanie, jak „daleko” uzyskane rozwiązanie „odbiega” od rozwiązania optymalnego (często mówi się o rozwiązaniu quasi-optymalnym).

Innym podejściem do uzyskania rozwiązania postawionego problemu jest wykorzystanie metod przybliżonych, metod heurystycznych. Z założenia metody te nie gwarantują uzyskania rozwiązań dokładnych (optymalnych).

Jeszcze inne problemy występują w przypadku problemów wielokryterialnych, niesprowadzalnych do jednego kryterium. Tutaj rozwinął się cały dział programowania wielokryterialnego, w szczególności optymalizacja w sensie Pareto.

Zwróćmy uwagę, że w znacznej części publikacji (jeśli nie w większości) nie ma weryfikacji opracowanych modeli i metod uzyskiwania rozwiązania na rzeczywistej dużej sieci transportowej. Zwykle autorzy podają uproszczone przykłady obliczeniowe dla co najwyżej kilku linii i jednego typu środka transportu. Pewnym wytłumaczeniem tej sytuacji jest konstatacja, że o ile zbudowanie teoretycznego modelu wydaje się względnie proste³, to uzyskanie rozwiązania nawet dla średniej wielkości sieci transportowej jest bardzo trudne. Problemy te klasyfikowane są jako NP trudne (NP-hard). Równie trudne jest uzyskanie wiarygodnych, pełnych danych dla obiektów rzeczywistych (zasadniczo nie

dotyczy to problemu synchronizacji interwałowej, gdzie optymalizujemy istniejący system komunikacji autobusowej i zwykle posiadamy pełen zestaw danych). Brak dokładnych danych próbuje się zastąpić oszacowaniami. Przykład taki można znaleźć w [4], gdzie zaproponowano „quasi-dynamiczne” zasady szacowania przepływu pomiędzy źródłem a miejscem przeznaczenia (o-d), przy założeniu, że udziały o-d są stałe w całym okresie odniesienia, podczas gdy łączne przepływy wychodzące z każdego z tych źródeł różnią się w każdym z tych podokresów w okresie odniesienia.

W przywoływanych przez nas publikacjach podawana jest przez autorów informacja o weryfikacji modelu (i algorytmu) na dużej rzeczywistej sieci transportowej:

- ♦ [1] – przedstawione są wyniki obliczeń z danymi dla miasta Poczdam w Niemczech;
- ♦ [16] – optymalizowany jest lokalny system autobusowy w Getyndze w Niemczech;
- ♦ [5] – model został zastosowany w Auckland, Nowa Zelandia;
- ♦ [10] – przedstawione są eksperymenty obliczeniowe przeprowadzone na danych z dużej istniejącej sieci transportowej (brak jednak lokalizacji sieci);
- ♦ [19] – badana jest sieć autobusowa Monterrey w Meksyku;
- ♦ [17] – model ten jest wdrażany w rozległej sieci transportowej Waszyngtonu w stanie D.C.;
- ♦ [31] – prowadzone jest studium przypadku, w którym opracowany model jest stosowany w celu optymalizacji koordynacji wielu tras autobusowych łączących się na stacji przesiadkowej w Xi’an w Chinach;
- ♦ [12] – model jest weryfikowany przy użyciu obserwowanych danych dotyczących automatycznej lokalizacji pojazdu (AVL) i automatycznego pobierania opłat (AFC) z dwóch tras z przesiadkami w południowo-wschodnim Queensland w Australii;
- ♦ [3] – proponowany w pracy algorytm jest sprawdzany w znanej szwajcarskiej sieci Mandl’a, opisanej w literaturze ([15]);
- ♦ [20] – opisana jest synchronizacja interwałowa dla rzeczywistej sieci komunikacji miejskiej (autobusowej) m. Ostrowiec Świętokrzyski w Polsce.

3. Węzły przesiadkowe

Węzeł komunikacyjno-przesiadkowy to szczególny zespół przystankowy. Na węzłach przesiadkowych dokonywane są przesiadki (transfery) pomiędzy różnymi środkami transportu, jak i w ramach jednego środka komunikacji. Przez przesiadkę rozumie się opuszczenie dotychczasowego środka komunikacji, dojście na inny przystanek (stację, peron itp.), jeśli jest to wymagane, oczekiwanie na nowy środek komunikacji, wsiadanie do środka komunikacji, jazda środkiem komunikacji do przystanku końcowego lub węzła przesiadkowego.

Organizacja przesiadek jest istotnym czynnikiem wpływającym na wykorzystanie środków transportu zbiorowego. Przy projektowaniu węzłów komunikacyjnych istotne są:

- ♦ pewność przesiadki;
- ♦ bezpieczeństwo;
- ♦ minimalizacja czasu przesiadki;
- ♦ łatwość przesiadki – likwidacja lub istotne ograniczenie barier architektonicznych;
- ♦ maksymalizacja liczby linii skomunikowanych;
- ♦ dobór właściwej częstotliwości kursowania w zależności od pory dnia;
- ♦ możliwość kompensacji opóźnień;
- ♦ zapewnienie dobrej widoczności dla wszystkich uczestników ruchu drogowego;

- ♦ zapewnienie odpowiednich warunków do realizacji przemieszczeń pieszych.

W obrębie węzłów przesiadkowych podstawowym sposobem przemieszczania się pasażerów są podróże piesze. W przypadku podróży pieszych i podróży łączonych z podróżą pieszą mogą być jednocześnie początkiem lub końcem podróży. Przemieszczanie piesze w obrębie dużych węzłów przesiadkowych jest coraz istotniejszym problemem badawczym. W publikacjach naukowych stosunkowo mało jest prac zajmujących się bezpośrednio tylko ruchem pieszych w obrębie węzłów przesiadkowych i analizą ich funkcjonowania z tego punktu widzenia. Węzeł przesiadkowy analizowany jest zwykle jako element (ważny) systemu transportowego w problemach synchronizacji przesiadkowej.

Analiza, modelowanie, „mierzenie” zachowań pieszych w systemach transportowych w literaturze rozpatrywane są w różnych aspektach. Podamy tylko kilka przykładów:

- ♦ w pracy [25] omawiana jest kwestia modelowania ruchu, a w szczególności podziału modalnego. W artykule podano różne definicje podróży pieszych stosowanych w praktyce. Przedstawiono wyniki badań poświęconych określeniu dopuszczalnej odległości do najbliższego przystanku transportu publicznego, co ma bezpośredni wpływ na analizę dostępności transportowej wybranego obszaru;
- ♦ Nishiuchia, Todorokib i Kishib [18] proponują metodę oceny węzłów przesiadkowych w oparciu o dane z kart inteligentnych (*smart card data*). Celem badania jest lepsze zrozumienie wykorzystania systemów transportu publicznego (tramwaje i autobusy) w centralnym mieście Kochi w Japonii w oparciu o zmiany środka transportu zarejestrowane na inteligentnych kartach użytkownika;
- ♦ Xi i Son [30] zaproponowali mikroskopowy, dwustopniowy model symulacyjny do analizy procesów decyzyjnych na skrzyżowaniu i fizycznych interakcji pomiędzy pieszymi przechodzącymi przez ulicę (również w powiązaniu z modelem symulacji transportu);
- ♦ w pracy [21] przedstawiono model analityczny oparty na kolejkowaniu, będący funkcją istotnych czynników determinujących i czynników funkcjonalnych służących do przewidywania czasu podróży w obiektach dla pieszych;
- ♦ Serge, Hoogendoorn i Bovy [24] przedstawiają dynamiczny, mieszany, dyskretno-ciągły model podróży pieszych i zachowań w obiektach użyteczności publicznej. W przedstawionym podejściu przyjęto zachowanie pieszych jako przejaw preferencji, zakładając, że piesi wybierają alternatywę, która maksymalizuje oczekiwaną (subiektywną) użyteczność, przy jednoczesnym uwzględnieniu niepewności co do przewidywanych warunków ruchu drogowego;
- ♦ w pracy [11] autorzy zbadali zagadnienia związane z rozwojem działań w zakresie dostępności dla roweru i podróży pieszych. Zauważają, że trudności w obliczaniu miar dostępności wynikają przede wszystkim z problemów z jakością danych, strefową strukturą modeli planowania transportu oraz adekwatnością modeli i sieci podróży do opisywania i przewidywania podróży niezmotoryzowanymi środkami transportu.

Podsumowanie

Choć problem optymalizacji transportu publicznego jest znany od co najmniej kilkudziesięciu lat, to – w związku z rozwojem motoryzacji indywidualnej, przeludnieniem obszarów miejskich, zmianami klimatycznymi – jest coraz bardziej istotny. Rozwój techniki, szczególnie informatyzacja i automatyzacja, pozwalają

na budowanie coraz bardziej złożonych modeli, uwzględniających jednocześnie więcej zmiennych i parametrów, kryteriów, w tym wielokryterialnych zadań optymalizacyjnych. Jednak nadal istotnymi ograniczeniami są możliwości uzyskania zadowalających rozwiązań w satysfakcjonującym czasie (efektywność algorytmów) i uzyskanie niezbędnych danych dla rzeczywistych dużych sieci transportowych. Istotnym problemem jest również porównanie „jakości” uzyskiwanych przez różnych autorów rozwiązań z wykorzystaniem danego modelu (podejścia) i efektywności opracowanych algorytmów. Jednym ze sposobów jest porównanie do rozwiązania przykładu podanego przez Christopha E. Mandla [15]. Sieć Mandli to mała i gęsta sieć złożona z 15 węzłów i łącznym zapo-żebowaniem na przewóz 15 570 pasażerów.

Przypisy

¹ Wydaje się, że Autorzy zbyt pesymistycznie zapatrują się na użyteczność OD-matryc.

² W literaturze przedmiotu algorytmy oparte na zasadzie „podziału i ograniczeń” (*branch & bound*) mają różne nazwy, np. *branch & cut*, *cutting plane*.

³ Kluczowe jest tu słowo „względnie”. Autorzy nie twierdzą, że budowa modelu jest łatwa i że „każdy” jest w stanie prawidłowo zbudować model. Jednak w stosunku do kolejnych etapów – pozyskanie danych i uzyskanie rozwiązania – dla dużych rzeczywistych problemów (sieci) jest relatywnie proste.

Bibliografia:

1. Borndörfer R., Grötschel M., Pfetsch M. E., *A Column-Generation Approach to Line Planning in Public Transport*, “Transportation Science” 2007, Vol. 41, No. 1, p. 123–132.
2. Borndörfer R., Grötschel M., Pfetsch M. E., *Models for Line Planning in Public Transport*, ZIB-Report, Berlin 2004: https://www.researchgate.net/publication/225218930_Models_for_Line_Planning_in_Public_Transport (dostęp: 14.12.2019).
3. Buba A. T., Lee L. S., *A differential evolution for simultaneous transit network design and frequency setting problem*, “Expert Systems With Applications” 2018, No. 106, p. 277–289.
4. Cascetta E., Papola A., Marzano V., Simonelli F., Vitiello I., *Quasi-dynamic estimation of o-d flows from traffic counts: Formulation, statistical validation and performance analysis on real data*, “Transportation Research Part B” 2013, No. 55, p. 171–187.
5. Ceder A., Net Y. L., Coriat C., *Measuring Public Transport Connectivity Performance Applied in Auckland, New Zealand*, “Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board” 2009, No. 2111, p. 139–147.
6. Ceder A., *Public-transport vehicle scheduling with multi vehicle type*, “Transportation Research Part C” 2011, No. 19, p. 485–497.
7. Ceder A., Tal O., *Designing Synchronization into Bus Timetables*, “Transportation Research Record” 2001, Vol. 1760, Issue 1, p. 28–33.
8. Dębowska-Mróż M., Rogowski A., *Analiza zmian natężenia ruchu drogowego na wybranych ciągach komunikacyjnych w Radomiu*, „Technika Transportu Szynowego” 2013, nr 10, s. 2953–2968.
9. Dębowska-Mróż M., Zawisza T., *Ocena napętnienia samochodów osobowych w aspekcie poprawy wykorzystania przestrzeni transportowej w miastach*, „Autobusy

- Technika, Eksploatacja, Systemy Transportowe” 2017, nr 12, s.1814–1818.
10. Guihaire V., Hao J.-K., *Transit network timetabling and vehicle assignment for regulating authorities*, “Computers & Industrial Engineering” 2010, No. 59, p. 16–23.
 11. Iacono M., Krizek K. J., El-Geneidy A., *Measuring non-motorized accessibility: issues, alternatives, and execution*, “Journal of Transport Geography” 2010, No. 18, p. 133–140.
 12. Kieu L. M., Bhaskar A., Cools M., Chung E., *An investigation of timed transfer coordination using event based multi agent simulation*, “Transportation Research Part C” 2017, No. 81, p. 363–378.
 13. Liu T., Ceder A., *Integrated Public Transport Timetable Synchronization and Vehicle Scheduling with Demand Assignment: A Bi-objective Bi-level Model Using Deficit Function Approach*, “Transportation Research Procedia” 2017, No. 23, p. 341–361.
 14. Liu Z., Shen J., Wang H., Yang W., *Regional Bus Timetabling Model with Synchronization*, “Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology” 2007, Vol. 7, No. 2, p. 109–112.
 15. Mandl Ch. E., *Evaluation and optimization of urban public transportation networks*, “European Journal of Operation Research” 1980, Vol. 5, Issue 6, p. 396–404.
 16. Michaelis M, Schöbel A., *Integrating line planning, timetabling, and vehicle scheduling: a customer-oriented heuristic*, “Public Transport” 2009, No. 1, p. 211–232.
 17. Nair R., Coffey C., Pinelli F., Calabrese F., *Large-Scale Transit Schedule Coordination Based on Journey Planner Requests*, “Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board” 2013, No. 2351, p. 65–75.
 18. Nishiuchia H., Todorokib T., Kishib Y., *A Fundamental Study on Evaluation of Public Transport Transfer Nodes by Data Envelop Analysis Approach Using Smart Card Data*, “Transportation Research Procedia” 2015, No. 6, p. 391–401.
 19. Omar J. Ibarra-Rojas O. J., Yasmin A. Rios-Solis Y. A., *Synchronization of bus timetabling*, “Transportation Research Part B” 2012, No. 46, p. 599–614.
 20. Oziomek J., Rogowski A., *Improvement of Regularity of Urban Public Transport Lines by Means of Intervals Synchronization*, “Transport Problems” 2018, Vol. 13, Issue 4, p. 91–102.
 21. Rahman K., Ghani N. A., Kamil A. A., Mustafa A., Chowdhury A. K., *Modelling Pedestrian Travel Time and the Design of Facilities: A Queuing Approach*, “PLOS-ONE” 2013, Vol. 8, Issue 5, p. 1–13.
 22. Schöbel A., *An eigenmodel for iterative line planning, timetabling and vehicle scheduling in public transportation*, “Transportation Research Part C” 2017, No. 74, p. 348–365.
 23. Schöbel A., *Line planning in public transportation: models and methods*, “OR Spectrum” 2012, No. 34, p. 491–510.
 24. Serge P., Hoogendoorn S. P., Bovy P. H. L., *Pedestrian Travel Behavior Modeling*, “Networks and Spatial Economics” 2005, No. 5, p. 193–216.
 25. Sierpiński G., Staniek M., Celiński I., Czech P., Barcik J., *Identification of pedestrian travel in modeling of modal split and transport accessibility*, “Logistyka” 2015, nr 4, s. 1495–1502.
 26. Varga B., Tettamanti T., Kulcsár B., *Optimally combined headway and timetable reliable public transport system*, “Transportation Research Part C” 2018, No. 92, p. 1–26.
 27. Winiarski M., Chrzan M., Ciszewski T., Nowakowski W., *A modification of the “Green wave” algorithm for the passage of an emergency vehicle*, “Transport Means” 2019, No. 2 (1), p. 609–614.
 28. Wu W., Liu R., Jin W., *Designing robust schedule coordination scheme for transit networks with safety control margins*, “Transportation Research Part B” 2016, No. 93A, p. 495–519.
 29. Wu Y., Tang J., Yu Y., Pan Z., *A stochastic optimization model for transit network timetable design to mitigate the randomness of traveling time by adding slack time*, “Transportation Research Part C” 2015, No. 52, p. 15–31.
 30. Xi H., Son Y.-J., *Two-level modeling framework for pedestrian route choice and walking behaviors*, “Simulation Modelling Practice and Theory” 2012, No. 22, p. 28–46.
 31. Xiao M., Chien S., Hu D., *Optimizing coordinated transfer with probabilistic vehicle arrivals and passengers’ walking time*, “Journal of Advanced Transportation” 2016, No. 50, p. 2306–2322.

Optimization of public transport

The article discusses the problem of optimization of public transport. Defined typical issues related to the optimization of public transport, in particular: stages of public transport network planning, way of description of transport network, construction of the objective function, synchronization of timetables, classification of network nodes, methods of solving the task.

Keywords: public transport, timetable, transport network, objective function.

Autorzy:

dr inż. **Marzenna Dębowska-Mróz** – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, e-mail: m.mroz@uthrad.pl
 dr hab. inż. **Andrzej Rogowski**, prof. UTH Rad. – Uniwersytet Technologiczno-Humanistyczny im. Kazimierza Pułaskiego w Radomiu, Wydział Transportu, Elektrotechniki i Informatyki, e-mail: a.rogowski@uthrad.pl