ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2003
Seria: BUDOWNICTWO z. 101 Nr kol. 1595

Jacek OSKARBSKI*
Politechnika Gdańska

MODELOWANIE ROZKŁADU RUCHU W SIECIACH TRANSPORTOWYCH Z UWZGLĘDNIENIEM ZMIENNOŚCI POPYTU NA TRANSPORT

Streszczenie. Stosowane powszechnie w planowaniu rozwoju systemów transportowych modele rozkładu ruchu w sieci najczęściej nie uwzględniają wpływu zjawiska zatłoczenia na zmiany zachowań transportowych mieszkańców. Zmiany te przejawiają się w rezygnacji z podróży w godzinach szczytowych, ograniczeniu długości podróży lub wyborze alternatywnego środka transportu. W referacie przedstawiono charakterystykę metod rozkładu ruchu, które pozwalają na modelowanie zmienności zachowań transportowych w miastach. Przedstawiono ponadto wyniki analiz z zastosowaniem elastycznego rozkładu ruchu.

MODELLING OF TRAFFIC ASSIGNMENT WITH VARIABLE DEMAND IN TRANSPORT NETWORKS

Summary. Impact of congestion on changes in in travellers behaviour (decision on not to make trip, to reduce trip lenght or choose alternative transport mode) is not included in traditional transport systems planning models. The paper concerns description of traffic assignment models with variable transport demand in large, medium-sized and small tows. The results of elastic assignment analysis are presented as well.

1. Wstęp

Efektywny system transportowy jest podstawą dla rozwijania aktywności gospodarczej i podnoszenia jakości życia mieszkańców. W ostatnich latach obserwujemy jednakże spadek efektywności systemów transportowych miast, który jest rezultatem wzrastającego zapotrzebowania na transport i związanego z tym zatłoczenia sieci ulicznej. Problem zatłoczenia możemy obserwować przede wszystkim w okresach szczytów transportowych.

* Opiekun naukowy: Prof. dr hab. inż. Ryszard Krystek.

Najczęściej właśnie wtedy wzrost popytu na podróże do poziomu, w którym jakość obsługi ruchu w sieci ulicznej staje się nieakceptowana przez kierowców, jest przyczyną zmian ich zachowań transportowych. Zmiany te przejawiać się mogą w zmianie wyboru czasu rozpoczęcia podróży, rezygnacji z podróży lub ograniczenia jej długości, lub rezygnacji z podróży samochodem i wyborze środka transportu zbiorowego [1].

2. Rozkłady ruchu ze zmiennym popytem transportowym

Stosowane w planistycznych analizach systemów transportowych modele rozkładu ruchu w sieci najczęściej nie uwzględniają wymienionych powyżej procesów, bazując na niezmiennej macierzy podróży. Wyniki analiz zatłoczonych sieci mogą być zatem obarczone znacznymi błędami na skutek procesów, zachodzących podczas ruchu w modelowanych sieciach systemów transportowych, a które nie występują w sieci rzeczywistej (np. zbyt duże wartości strat czasu na wlotach skrzyżowań, nierealistyczny wybór tras podróży, które mogą ulec zablokowaniu w trakcie obliczeń wg zastosowanego modelu). Rysuje się zatem potrzeba stosowania procesów obliczeniowych, które z jednej strony uwzględniają wpływ elementów sieci ulicznej na warunki ruchu i jego rozkład, z drugiej zaś strony pozwalają na modelowanie zmienności zachowań transportowych ludności, co przejawia się w zmianie popytu na podróżowanie poszczególnymi środkami transportu. Przykładami metod, które uwzględniają powyższe czynniki, są: metoda sieci alternatywnych („shadow networks"), metoda ograniczenia macierzy („matrix capping"), metoda przyrostowego obciążania sieci („incremental loading") oraz elastyczny rozkład ruchu („elastic assignment") [2], [3].

Pierwsza z wymienionych metod bazuje na modelu sieci, który, oprócz modelu sieci rzeczywistej, zawiera model sieci alternatywnej, połączonej z siecią rzeczywistą w punktach, w których umiejscowione są źródła i cele podróży. Założono, że wszystkie połączenia w sieci alternatywnej charakteryzują stałe prędkości o małych wartościach i nieskończoną wartość przepustowości, a ich długość odpowiada długościom połączeń w sieci rzeczywistej. Podczas procesu rozkładu ruchu do sieci alternatywnej przeniesione zostają te podróże samochodem, których koszt, liczony na podstawie porównania wartości parametrów połączeń w obu sieciach, będzie mniejszy. Warunki brzegowe można zdefiniować w taki sposób, że w przypadku gdy prędkość na danym połączeniu w sieci rzeczywistej będzie mniejsza od prędkości akceptowanej przez kierowców (np. 15 km/h), wszystkie kolejne podróże

samochodem, które przyczyniłyby się do zmniejszenia wartości granicznej tego parametru, zostaną przeniesione do sieci alternatywnej, redukując w ten sposób popyt wyjściowy [2], [4], [5]. Przykładem sieci alternatywnej może być sieć transportu zbiorowego. Tłumiony popyt będzie reprezentowany w tym przypadku przez podróże kierowców, którzy rezygnują z jazdy samochodem w danym okresie obliczeniowym, wybierając inny środek transportu.

W metodzie ograniczania macierzy wejściowa macierz jazd samochodem jest macierzą popytu, który zostaje tłumiony pomiędzy danymi relacjami źródło-cel w różnym stopniu, w zależności od wartości przepustowości na połączeniach lub poszczególnych relacji na skrzyżowaniach i wartości przydzielonych potoków ruchu. W pierwszym kroku procedury zostają zidentyfikowane połączenia w modelu sieci, na których wartość przydzielonego potoku ruchu przekracza wartość przepustowości. W stosowanym modelu jest to teoretycznie możliwe, ponieważ w pierwszym kroku rozkładu ruchu w sieci wybór tras podróży zależny jest od czasu podróży na poszczególnych połączeniach i/lub długości tych połączeń, bez uwzględnienia ograniczeń przepustowości. W kolejnym kroku zostają zidentyfikowane relacje źródło – cel, które uczestniczą w obciążeniu połączeń krytycznych, a liczba podróży generowanych i absorbowanych dla tych relacji zostaje zredukowana, tak aby wartość potoku ruchu na połączeniu nie przekroczyła wartości przepustowości [2], [4], [6]. W opisywanej procedurze przepustowość można zdefiniować jako maksymalną wartość natężenia ruchu, który może przejechać przez przekrój drogi, przez wlot na skrzyżowanie lub dany pas ruchu w określonym czasie, przy określonych warunkach drogowo-ruchowych i sygnalizacyjnych. Przepustowość pasa ruchu na połączeniu odpowiada wartości krytycznego natężenia ruchu na poziomie swobody ruchu E. Proces rozkładu ruchu w sieci zostaje powtórzony z wykorzystaniem zmodyfikowanej macierzy.

W metodzie przyrostowego obciążania sieci z macierzy popytu bierze się częściową wartość jej elementów. Podobnie jak w metodzie sieci alternatywnych, wszystkie kolejne podróże samochodem, które przyczyniłyby się do zmniejszenia wartości granicznej prędkości, zostają wyłączone z procedury przyrostowej [7].

Dla niezmiennej macierzy podróży rozkład równowagi Wardropa („Wardrop Equilibrium") zakłada, że ruch w sieci zatłoczonej rozkłada się w taki sposób, aby koszt podróży wszystkimi spośród tras, wykorzystywanych przez daną parę relacji źródło-cel był mniejszy lub równy od kosztu podróży trasami niewykorzystywanymi. W metodzie równowagi Wardropa dla niezmiennej macierzy podróży poszukiwany jest minimalny uogólniony kosz podróży dla całej sieci [8] wg wzoru:

$$Z = \sum_{a} \int_{0}^{Va} Ca(V)dV \tag{1}$$

gdzie: Z – minimalny uogólniony koszt podróży w sieci, Ca(V) – koszt podróży dla odcinka „a" w sieci ulic, zdeterminowany wielkością potoku ruchu, V – wielkość potoku ruchu na odcinku, Va – wielkość potoku ruchu na odcinku „a" (w celu znalezienia minimalnej wartości uogólnionego kosztu podróży wartość Va może przyjmować różne wartości w procedurze iteracyjnej). Rozkład elastyczny rozszerza powyższe (1) podejście poprzez założenie, że popyt na podróże pomiędzy każdą parą rejonów źródło-cel podlega zmianom w zależności od zmian kosztów podróży pomiędzy daną parą rejonów. Popyt na podróże możemy określić stosując model rozkładu przestrzennego, w którym oblicza się liczbę podróży pomiędzy rejonami na podstawie potencjałów ruchotwórczych (np. metoda grawitacyjna) (2).

$$T_{ij} = \frac{P_i A_j}{\sum_{i=1}^{n} P_i} = \frac{P_i A_j}{\sum_{j=1}^{n} A_j} \tag{2}$$

gdzie: T_{ij} – liczba podróży pomiędzy rejonami i, j transportem indywidualnym i zbiorowym, P_i – potencjał generujący podróże, A_j – potencjał absorbujący.

Elastyczność popytu na podróże ze względu na zmiany w kosztach podróży charakteryzuje równanie (3). Należy pamiętać o tym, że „elastyczność" odnosi się w rozważanym przypadku do podziału zadań przewozowych lub rezygnacji z podróży w danym czasie.

$$e=(\Delta T_{ij}/T_{ij}) / (\Delta c_{ij}/c_{ij}) \tag{3}$$

gdzie: e – parametr elastyczności popytu, ΔT_{ij} – obliczona w rozkładzie elastycznym zmiana liczby podróży i-j, T_{ij} – liczba podróży pomiędzy rejonami i-j, Δc_{ij} – zmiana kosztu podróży i-j, c_{ij} – koszt podróży i-j.

Podobnie jak w metodzie sieci alternatywnych w rozkładzie elastycznym, obok modelu sieci rzeczywistej, zostaje zdefiniowana sieć pseudopołączeń pomiędzy każdą parą rejonów transportowych. W zależności od wartości kosztów podróży na danej trasie pomiędzy parą rejonów zostają one rozłożone albo w sieci rzeczywistej, albo w sieci pseudopołączeń. Podróże przeniesione do sieci pseudopołączeń reprezentują tłumioną wartość popytu. Podstawowym zagadnieniem w rozkładzie elastycznym jest wybór formy i parametrów funkcji popytu. Wybór danej funkcji popytu i jej parametrów decyduje o tym, czy tłumieniu będą podlegały w większym stopniu podróże na krótkie czy długie odległości. W przypadku zastosowania funkcji logitowych lub zagnieżdżonych logitowych, które uzależniają wybór od

różnicy kosztów konsekwencji danego wyboru, występuje tendencja do tłumienia podróży na długie odległości. Przykładem funkcji logitowej (4) jest model wyboru na podstawie różnicy kosztów podróży danym środkiem transportu.

$$T_{ij}^{E} = T_{ij}/\{1 + \exp[\beta(c_{ij}^{S} - c_{ij}^{Z})]\} \tag{4}$$

gdzie: T_{ij}^{E} – obliczona w rozkładzie elastycznym liczba podróży samochodem pomiędzy rejonami i-j, T_{ij} – całkowita liczba podróży pomiędzy daną parą rejonów i-j, c_{ij}^{S} – koszt podróży transportem indywidualnym, c_{ij}^{Z} – koszt podróży transportem zbiorowym, β – parametr elastyczności wyboru.

3. Analizy elastycznego rozkładu ruchu w wybranych modelach sieci

W celu określenia wpływu wyboru techniki rozkładu ruchu w sieci ulicznej na obliczone parametry ruchu przeprowadzono analizy dla 8 modeli sieci o różnej wielkości i dokładności odwzorowania sieci (rys.1). Modele sieci zbudowano i analizowano z wykorzystaniem pakietu SATURN [9]. Do kalibracji i monitorowania przepływu ruchu w poszczególnych modeli sieci ulicznej miast wykorzystano pomiary rzeczywistych natężeń ruchu. Macierze podróży dla charakteryzowanych modeli w roku, w którym przeprowadzono pomiary ruchu, obliczono bądź poprzez estymację macierzy historycznej, lub z wykorzystaniem metod grawitacyjnych. Każdy z wymienionych powyżej modeli sieci obciążono macierzą podróży z wykorzystaniem elastycznych metod rozkładu ruchu w sieci: rozkładu elastycznego z potęgową funkcją popytu (CE) (5) oraz rozkładu elastycznego z wykładniczą funkcją popytu (SL) (6).

$$T_{ij}^{E} = T_{ij}\,(c^{S}/c^{0})^{-p} \tag{5}$$

$$T_{ij}^{E} = T_{ij}\exp(\beta(c^{S}/c^{0} - 1)) \tag{6}$$

gdzie: T_{ij}^{E} - obliczona w rozkładzie elastycznym liczba podróży samochodem pomiędzy rejonami i-j, T_{ij} - liczba podróży w macierzy wyjściowej, c^{S} - koszt podróży transportem indywidualnym obliczony w rozkładzie ruchu, c^{0} - koszt podróży transportem indywidualnym w warunkach swobodnych, p - parametr elastyczności popytu dla funkcji potęgowej popytu (5), β - parametr elastyczności popytu dla funkcji wykładniczej (6).

Parametry elastyczności wyboru są podobne do parametrów elastyczności popytu stosowanych w ekonomii. Zastosowane funkcje (5), (6) upraszczają podejście przedstawione we wzorze (4) (gdzie parametr β odnosił się do wszystkich podróży w sieci) poprzez poszukiwanie takiej wartości parametru elastyczności popytu na jazdy samochodem, który uwzględnia wszystkie czynniki, mające wpływ na rezygnację z podróży tym środkiem

transportu, w tym również jakości transportu zbiorowego. Podczas analizy rozkładu ruchu z wykorzystaniem funkcji popytu (5) i (6) założono wstępnie cztery wartości parametru p oraz β (0,2; 0,5; 0,8, 1,0) w celu analizy zmienności redukcji popytu. Poprzez przyjęcie większej wartości parametru p oraz β definiujemy większą elastyczność popytu. Założone wartości parametru elastyczności w granicach od 0,2 do 1,0 wydają się spełniać wymogi wrażliwości modelu (przyjęcie parametru o wartości równej 0 nie uwzględnia czynnika elastyczności popytu, przyjęcie parametru o wartości powyżej 1,0 nie wpływa na dalszą, wyraźną redukcję popytu). Podczas analiz systemów transportowych można przypisać odpowiednią wagę do czasu podróży i jej długości w celu zamodelowania wpływu tych dwóch czynników na wybór trasy przez kierowcę [8]. Powyższą sytuację można przedstawić równaniem [9]:

$$C=PPM \cdot T + PPK \cdot D \tag{7}$$

gdzie: C – całkowity, uogólniony koszt podróży, T – czas podróży [min], D – długość podróży [km], PPM – współczynnik określający wagę czasu podróży w koszcie uogólnionym, PPK – współczynnik określający wagę długości podróży w koszcie uogólnionym.

Na potrzeby niniejszych analiz przyjęto następujące wagi czasu i długości podróży: PPM=1, PPK = 0,5 [3]. W celu kalibracji parametru elastyczności należy przeprowadzić analizy z wykorzystaniem danych o motywacji podróży oraz jakości transportu zbiorowego w rozpatrywanych miastach, co autor referatu zamierza uczynić. Obliczenia przeprowadzono dla godziny szczytu popołudniowego. Poszczególne modele sieci charakteryzują się różnym poziomem zatłoczenia. Jako miarę zatłoczenia przyjęto stosunek przyrostu czasu podróży, wynikającego z zatłoczenia, do czasu podróży w sieci wszystkich pojazdów w warunkach ruchu swobodnego (8).

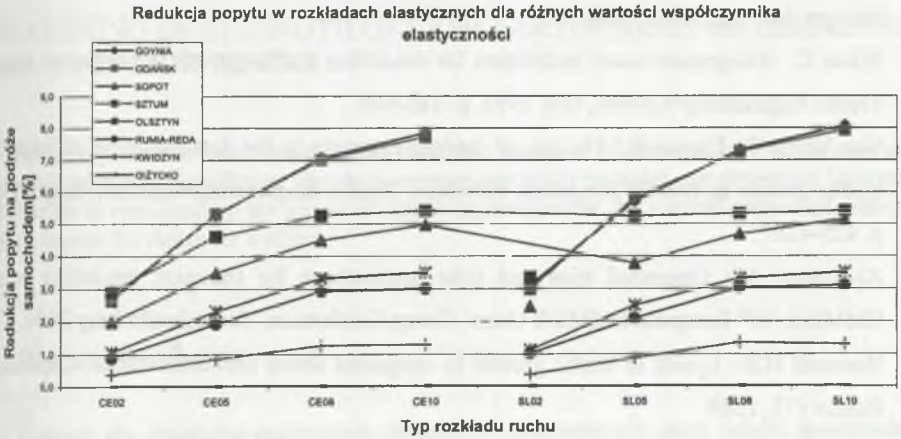
$$E=(t-t0)/t0 \tag{8}$$

gdzie: E – wskaźnik zatłoczenia, t – czas jazd samochodem w warunkach zatłoczenia, t0 – czas jazd samochodem w warunkach ruchu swobodnego. Największe zatłoczenie w godzinie szczytu popołudniowego wystąpiło w Gdańsku, Sopocie, Gdyni i Sztumie (25 – 32%), nieco mniejsze w analizowanych obszarach Olsztyna, Rumii i Redy (6 – 10%), natomiast najmniejsze w Kwidzynie i Giżycku (0 – 2,5%). Przedstawione na rys. 1 oznaczenia CE02 – CE10 reprezentują rozkłady elastyczne dla założonego parametru p o wartościach 0,2 – 1,0, SL02 – SL10 reprezentują rozkłady elastyczne dla założonego parametru β o wartościach 0,2 – 1,0. Analizując uzyskane wyniki, można domniemywać, że stopień redukcji popytu jest wypadkową funkcji jakości transportu zbiorowego, jakości połączeń pomiędzy poszczególnymi rejonami transportowymi (kształt sieci ulicznej i parametry jej elementów) oraz stopnia zatłoczenia sieci. Porównanie wartości potoku obliczonego podczas rozkładu ruchu i pomiarów natężeń ruchu wykazało, że dla poszczególnych modeli (przeanalizowano

ok. 100 wariantów) sieci najwyższa wartość współczynnika korelacji R^2 (dla funkcji Y=X) wystąpiła w przypadku rozkładu elastycznego o wykładniczej funkcji popytu, jednakże dla różnych wartości parametru β. Dla miast dużych wartość współczynnika β lub p dla największego współczynnika korelacji przyjmuje wartości bliższe 0 (0,2 lub 0,5), dla miast małych lub średnich wartości bliższe 1 (0,8). Fakt ten może świadczyć o:

- większej liczbie podróży obligatoryjnych w większych miastach podczas szczytu popołudniowego (większa liczba podróży o motywacji praca – dom),
- wyższej w większych miastach jakości obsługi transportem zbiorowym.

Analizy z wykorzystaniem rozkładów elastycznych wykazały, że średnia długość podróży zmniejszyła się ok. 2 - 4% w porównaniu do wyników rozkładu nieelastycznego. Wyraźne zmiany dotyczyły natomiast czasu podróży: w sieciach o największym stopniu zatłoczenia średni czas podróży w rozkładzie elastycznym zmniejszył się ok. 10 - 25% w porównaniu do wyników rozkładu nieelastycznego.



Rys. 1. Redukcja popytu na podróże samochodem w rozkładach elastycznych dla poszczególnych wartości współczynnika elastyczności

Fig. 1. Demand reduction in private transport trips at the case of different elasticities and different elasticity functions

4. Zakończenie

Przedstawione w niniejszym referacie wyniki analiz potwierdziły możliwość stosowania rozkładów elastycznych w modelowaniu układów transportowych miast, umożliwiając

badanie wpływu zmian w podaży sieci transportowej na zmiany zachowań transportowych mieszkańców.

LITERATURA

1. Oskarbski J.: Modelowanie rozkładu ruchu w warunkach zatłoczenia w miastach średniej wielkości. IV Konferencja Naukowo-Techniczna „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego", Poznań maj 2003, s. 311-320.
2. Al-Azzawi M.: An overview of three techniques designed to aid planners with over-assignment and peak spreading in traffic modelling studies. Traffic Engineering+Control, Nov. 1997, p. 604-606.
3. The Highways Agency, The Scottish office Development Department, The Welsh Office, The Department of the Environment for Nothern Ireland: Design Manual for Roads and Bridges, Vol. 12, Sec. 2, May 1996.
4. White C.: Assignment-based techniques for modelling traffic growth in congested areas. Traffic Engineering+Control, Oct. 1995, p. 543-549.
5. Van Vuren T., Davies R.: The use of shadow networks in the determination of limits to traffic growth in heavily-congested networks. Traffic Engineering+Control, Aug. 1992, p. 425-428.
6. Al-Azzawi M.: Generated trips and their implications for transport modelling using EMME/2. 10th European EMME/2 Users' Group Conference, Thessaloniki May 2001.
7. Hounsell N.B.: Limits to traffic growth in congested urban networks. TRLL Contractor Report 171, 1989.
8. Hensher D.A., Button K.J.: Handbook of Transport Modelling. Pergamon, UK 2000.
9. Van Vliet D., Hall M.: SATURN 9.3. user manual. Leeds/Surrey 1997.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Rudnicki

Abstract

The paper concerns description of traffic assignment models with changeable transport demand. Examples of elastic traffic assignment models were presented to consider influence of transport demand modifications and congestion on changes in travellers behaviour.