

Renata ŻOCHOWSKA

## DYNAMICZNE MACIERZE PODRÓŻY W SIECIACH MIEJSKICH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono metody wyznaczania macierzy podróży, ze szczególnym uwzględnieniem dynamicznego ujęcia problemu. Ze względu na potencjalne wykorzystanie metod wyznaczania macierzy podróży na podstawie wielkości natężeń na odcinkach sieci transportowej, w dynamicznym sterowaniu i zarządzaniu ruchem w sposób schematyczny podjęto próbę uogólnienia procesu obliczeniowego. Dla usprawnienia obliczeń opracowano oryginalne narzędzie informatyczne.

## DYNAMIC OD MATRICES IN URBAN NETWORKS

**Summary.** The methods of OD matrix estimation taking dynamic depiction of problem into consideration have been presented in the article. For the sake of potential application of OD matrices using traffic counts in dynamic traffic management it has been made an attempt to generalize the estimation in schematic way. To make the calculation more efficient the software application has been designed.

### 1. WPROWADZENIE

Znajomość macierzy podróży jest konieczna w analizach związanych z planowaniem potoków ruchu, sporządzaniem prognoz ruchowych oraz projektowaniem zmian organizacyjnych. Stanowi ona odzwierciedlenie popytu transportowego w układzie relacji przemieszczania. Dynamiczne macierze podróży zawierają informacje, niezbędne do efektywnego zarządzania ruchem, kiedy w sytuacjach krytycznych (wypadki, roboty drogowe lub inne sytuacje awaryjne) konieczna jest wiedza o celach podróży poszczególnych uczestników ruchu. Dopiero na tej podstawie można wyznaczać optymalne trasy objazdowe w sieciach miejskich.

Poszczególne komórki dwuwymiarowej macierzy podróży reprezentują wielkość potoku ruchu, wyrażoną liczbą podróży realizowanych pomiędzy parą rejonów komunikacyjnych. Środki ciężkości, wyznaczone dla każdego rejonu, reprezentują miejsce kumulacji potencjału wyjazdowego i dojazdowego rejonu. W rozwiązaniach praktycznych środki te zwykle przeniesione zostają za pomocą połączeń do najbliższych węzłów sieci technicznej (np. drogowej, kolejowej, itp.). W związku z tym wyznaczenie macierzy podróży pomiędzy dwoma rejonami można sprowadzić do wyznaczenia wielkości ruchu pomiędzy dwoma węzłami technicznej sieci transportowej.

Macierze podróży można budować dla poszczególnych środków transportu, dla określonych interwałów czasu, dla różnych motywacji podróży oraz grup uczestników ruchu. Macierze te mogą być wyznaczone dla stanu istniejącego lub dla stanu przyszłego (prognozowanie ruchu). Poszczególne elementy macierzy podróży mogą być wyrażone jako

wartości liczby podróży lub udziału procentowe potoku, który przemieszcza się z danego rejonu w różnych kierunkach.

Przy rozważaniu zastosowania macierzy podróży w sterowaniu ruchem szczególną uwagę należy zwracać na konieczność i możliwość częstej aktualizacji danych wejściowych, zgodnie ze zmianami zachodzącymi w rzeczywistym potoku ruchu w sieci miejskiej. Dlatego sposób wyznaczania takich macierzy zwykle ma charakter dynamiczny i opiera się na znajomości bieżących natężeń na odcinkach sieci.

## 2. METODY WYZNACZANIA MACIERZY PODRÓŻY

Modele wyznaczania macierzy podróży można podzielić na statyczne i dynamiczne. W modelach statycznych zakłada się, że zarówno popyt transportowy, jak i podaż sieci są niezmiennie w czasie. Modele dynamiczne zakładają zmienność podaży i popytu w czasie, a w związku z tym są bardziej skomplikowane i wymagają znacznie większej liczby danych wejściowych. W planowaniu sieci transportowej można wykorzystywać zarówno modele statyczne, jak i dynamiczne. Natomiast w sterowaniu i zarządzaniu ruchem głównie wykorzystuje się modele dynamiczne, bazujące na informacjach o natężeniach na poszczególnych odcinkach sieci transportowej.

Klasyczne metody modelowania rozkładu przestrzennego można podzielić na dwie podstawowe grupy [10]:

- modele ekstrapolacyjne,
- modele analityczne.

Modele ekstrapolacyjne wykorzystują pewne, znane wcześniej macierze podróży oraz nowe wartości potencjałów, generujących i absorbujących ruch. W tej grupie można wyróżnić modele oparte na wskaźnikach wzrostu oraz różne odmiany modeli Frataro [10]. Jednak, ekstrapolacja może być stosowana wyłącznie w warunkach względnej stabilizacji.

Wśród metod analitycznych należy wymienić modele [18]:

- minimalny,
- proporcjonalny (maksymalny),
- rzeczywisty.

W modelu minimalnym zakłada się, że wszyscy zawodowo czynni są zatrudnieni wewnątrz rejonów, w których mieszkają. Nadwyżka kierowana jest do najbliższego rejonu, mającego niedobór pracujących. Jest to model o najmniejszym rozproszeniu, który zaoszczędza podróżującym najwięcej czasu oraz zapewnia najniższe koszty transportu.

Model proporcjonalny stanowi punkt wyjścia dla wielu metod rzeczywistych. Potoki tego rozkładu rozptywiają się z każdego rejonu proporcjonalnie do liczby miejsc pracy w poszczególnych rejonach. Model proporcjonalny jest najbardziej prawdopodobnym rozkładem w warunkach losowego wyboru miejsca pracy przy założeniu, że atrakcyjność wszystkich rejonów jest jednakowa, a prawdopodobieństwo jego występowania rośnie wraz ze wzrostem liczby rejonów [18].

Wśród metod rzeczywistych warto wymienić także:

- metodę Lilpopy – wykorzystującą wyznaczony eksperymentalnie współczynnik rozproszenia. Metoda ta nie bierze jednak pod uwagę wpływu odległości albo czasu podróży, wskutek czego dla rejonów odległych uzyskuje się wartości potoków większe niż w rzeczywistości, a dla rejonów leżących blisko siebie – zaniżone;

- metody grawitacyjne – opierające się na założeniu, że liczba podróży pomiędzy dwoma ustalonymi rejonami jest proporcjonalna do ich potencjałów, a dodatkowo uwzględnia opór przestrzeni, wyrażający zależność liczby podróży między dwoma rejonami od kosztu pokonania przestrzeni między nimi [10];

- metody pośrednich możliwości – uzależniające liczbę podróży pomiędzy dwoma rejonami od prawdopodobieństwa zakończenia podróży przy najbliższej nadarzającej się sposobności oraz potencjału absorbującego, który maleje wraz ze wzrostem odległości do rejonu docelowego [2, 14].

Metody klasyczne oraz ich modyfikacje znalazły zastosowanie w wielu aplikacjach komputerowych, służących do prognozowania oraz kompleksowych analiz ruchu drogowego. Wśród najczęściej stosowanych w Polsce pakietów komputerowych należy wymienić EMME/2, PTV VISION, SATURN i TRIPS [12].

Wspomniane wyżej metody wymagają znajomości wielu parametrów, charakteryzujących atrakcyjność komunikacyjną danego rejonu, oraz szczegółowych danych dotyczących np. liczby osób odwiedzających jednostki handlowe i usługowe, liczby uczniów różnego typu szkół czy liczby mieszkańców w rozbiciu na poszczególne grupy jednorodnych zachowań komunikacyjnych. Często parametry te są trudne do określenia. Stąd metody te nie nadają się do opisu zjawiska zmiennego w czasie. W przypadku konieczności stałej aktualizacji parametrów ruchu, zgodnie z bieżącą sytuacją (sterowanie i zarządzanie ruchem, sytuacje awaryjne) klasyczne metody się nie sprawdzają.

W związku z tym, w latach osiemdziesiątych obok metod klasycznych rozwinęła się grupa metod opartych na znajomości natężeń na poszczególnych odcinkach międzywęzłowych analizowanej sieci miejskiej. Ze względu na swoją specyfikę metody te mogą być wykorzystywane do dynamicznego zarządzania ruchem (np. systemy ATMS (Advanced Traffic Management Systems), ATIS (Advanced Traveler Information Systems), itd.), uwzględniając zmienność ruchu w czasie [25].

Jedne z pierwszych modeli tego typu zostały opracowane przez Van Zuylena i Willumsena [27]. Modele te oparte są na proporcjonalnym rozkładzie ruchu, w którym dla każdego odcinka międzywęzłowego empirycznie wyznaczono pewne współczynniki, określające proporcje pomiędzy poszczególnymi składowymi jego potoku.

Problematyką związaną z wyznaczeniem macierzy podróży na podstawie natężenia na odcinkach międzywęzłowych na szeroką skalę zajmował się Yang, który zastosował model programowania dwupoziomowego [29]. Zadanie poziomu nadrzędnego polega na poszukiwaniu takiej nieujemnej macierzy podróży, która minimalizuje ważoną sumę odchyleń kwadratowych od pierwotnej macierzy podróży oraz odchyleń od zaobserwowanych natężeń na odcinkach. Wartości natężeń na odcinkach określone są w zadaniu poziomu podrzędnego przez zastosowanie równoważnego rozkładu potoków ruchu na sieć.

W kolejnych opracowaniach Yang udoskonala swój model uwzględniając wzajemne oddziaływanie potoków przy określaniu funkcji opóźnienia na odcinku [28]. W modelu heurystycznym wykorzystuje dwa alternatywne wskaźniki zależności. Pierwszy z nich zdefiniowany jest jako udział wykorzystania odcinka, drugi jako pochodna natężenia na odcinku ze względu na element macierzy podróży, stanowiącej tymczasowe rozwiązanie zadania poziomu podrzędnego.

Wykorzystaniem modelowania liniowego w określaniu macierzy podróży na podstawie natężeń na odcinkach zajmował się również Sherali. Optymalizacja funkcji celu w modelu Sherali'ego polega na minimalizacji sumy kosztów podróży oraz odchyleń wyników, uzyskanych z rozkładu równoważnego potoków na sieć drogową od wartości zaobserwowanych natężeń i założonej pierwotnie macierzy podróży [23].

W kolejnych publikacjach Sherali dostosowuje swój model do sytuacji, w której nie są znane natężenia na wszystkich odcinkach [21]. Rozwiązanie może być określone tylko dla pewnych, ustalonych punktów, które zostały wyznaczone heurystycznie przez iteracyjne dopasowanie nieliniowego modelu sekwencją zadań programowania liniowego. Sherali opracował również inne modele, stosowane przy wyznaczaniu dynamicznych macierzy podróży [20, 22].

Podjęmowano również próby budowy macierzy podróży na podstawie nowych technik, takich jak algorytmy genetyczne [19, 9], czy sieci neuronowe [29].

### **3. OGÓLNY MODEL WYZNACZANIA MACIERZY PODRÓŻY NA PODSTAWIE ZNAJOMOŚCI NATĘŻEŃ NA ODCINKACH SIECI MIEJSKIEJ**

Problem obliczania dynamicznej macierzy podróży jest problemem odwrotnym do problemu dynamicznego rozkładu potoków ruchu na sieć (DTA – Dynamic Traffic Assignment) [8, 17, 20, 13]. W pracy [4] rozszerzono graf, opisujący strukturę sieci transportowej w czasoprzestrzeni wprowadzając pomocniczą macierz, określającą dla każdego przedziału czasu liczbę interwałów potrzebnych do przejścia przez odcinek sieci, na którym znajduje się pojazd. Wykorzystując tę interpretację, problem dynamiczny można sprowadzić do problemu statycznego w czasoprzestrzeni.

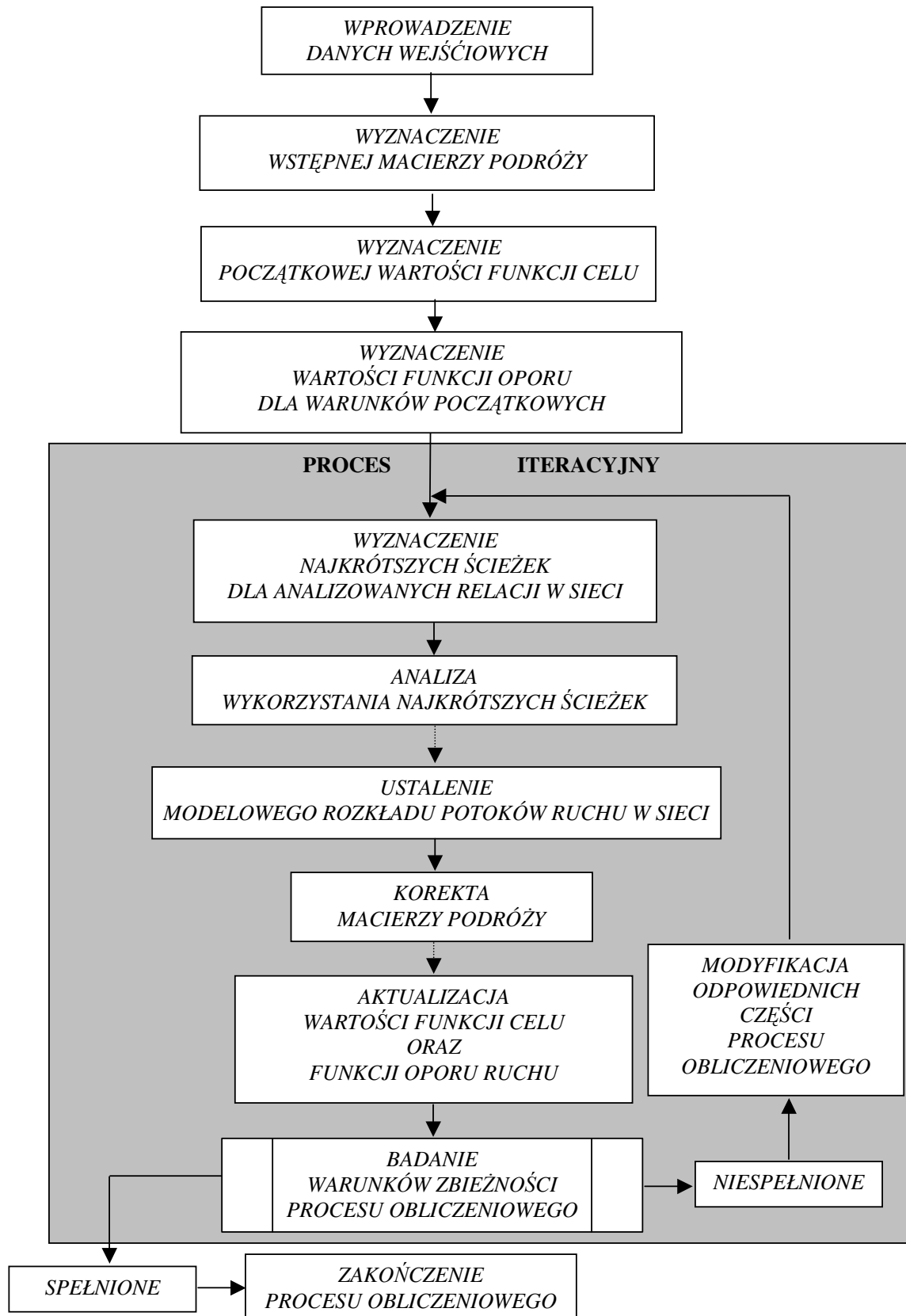
Proces wyznaczania macierzy podróży na podstawie informacji o natężeniach na poszczególnych odcinkach sieci drogowej, można uogólnić i przedstawić schematycznie, jak na rys.1. W ujęciu dynamicznym analizowany przedział czasu podzielony jest na interwały, w czasie których rejestruje się bieżące natężenie ruchu. W związku z tym, prezentowany proces obliczeniowy należy przeprowadzać dla każdego interwału ze względu na zmienność natężenia w czasie.

Dane wejściowe obejmują opis struktury sieci z wykorzystaniem teorii grafów oraz zapis relacji występujących w tej sieci, przedstawiony w postaci macierzowej. Elementem niezbędnym do wyznaczenia związków ruchowych jest znajomość punktów źródłowych i docelowych, występujących w analizowanej sieci. W związku z dynamicznym ujęciem problemu wartości natężeń na poszczególnych odcinkach sieci, w kolejnych interwałach są również daną wejściową. W sytuacji rzeczywistej często zbiór odcinków, dla których zaobserwowano wartości natężeń ruchu w kolejnych chwilach czasu jest znacznie mniejszy niż zbiór wszystkich odcinków. W związku z tym, stosowane są różne metody, szacujące brakujące elementy. Dodatkowe dane mogą być związane z charakterystykami technicznymi i ruchowymi węzłów i odcinków.

Wyznaczenie wstępnej macierzy podróży w głównej mierze zależy od wybranego algorytmu obliczeniowego. Często jest to wartość określana na podstawie wcześniejszych macierzy popytu (uzyskiwanych w sposób empiryczny lub analityczny) albo szacowana na podstawie zaobserwowanych natężeń.

Wybór odpowiedniej funkcji celu nie jest prostym zagadnieniem. Zwykle funkcja ta przedstawia „odległość” modelowego rozwiązania od rzeczywistych wielkości natężeń, zaobserwowanych na odcinkach, która podczas procesu obliczeniowego jest minimalizowana. W stosowanych metodach zapewnienie jak największej zgodności jest opisane z wykorzystaniem m.in. metody najmniejszych kwadratów [6, 1, 5], maksymalnej entropii [27, 3] lub maksymalnej wiarygodności (prawdopodobieństwa) [24]. Funkcja celu zwykle określona jest dla wszystkich odcinków, ale może również być ustalana jedynie dla odcinka krytycznego o największych odchyleniach od wartości empirycznych. Początkowa wartość funkcji celu ustalana jest często na podstawie przyjętej wstępnej macierzy podróży.

Dla każdego odcinka oraz węzła przyjmuje się określoną wartość funkcji oporu zwykle zależną od zmienności natężenia ruchu w czasie. Sposób jej wyznaczenia może być różny: począwszy od przyjęcia pewnych stałych parametrów (np. jako tzw. kary czasowe dla relacji skrętnych), a skończywszy na złożonych metodach obliczeniowych (dynamiczne wyznaczanie strat czasu dla poszczególnych, elementarnych składników sieci).



Rys. 1. Schemat wyznaczania macierzy podróży  
 Fig. 1. Scheme of origin-destination matrix estimation

Proces iteracyjny obejmuje wyznaczenie najkrótszych ścieżek i analizę ich wykorzystania dla poszczególnych relacji, określenie modelowego rozłożenia ruchu w sieci oraz badanie warunków zbieżności procesu obliczeniowego.

Algorytmy wyznaczania najkrótszych ścieżek w sieci należą do zagadnień o największej złożoności obliczeniowej, która wzrasta wraz z rozmiarem sieci. W metodach dynamicznych czas obliczeń jest bardzo istotny i pomimo wciąż wzrastających możliwości technicznych narzędzi informatycznych dąży się do wykorzystywania algorytmów o jak najmniejszej złożoności obliczeniowej. Dla każdej relacji wyznaczane są ścieżki o minimalnej, chwilowej wartości funkcji oporu, a następnie określa się stopień jej wykorzystania przez pojazdy danej relacji. W gęstych sieciach (dla niektórych relacji) wyznacza się kilka lub kilkanaście ścieżek, na które następnie rozkłada się odpowiednią wielkość macierzy podróży. Proces ten również zwykle ma charakter iteracyjny. Ścieżki dla poszczególnych relacji można wyznaczyć jedną z metod najkrótszych (najtańszych) ścieżek [26, 11, 16], przyjmując jako kryterium poszukiwania czas lub koszty podróży.

Wybór odpowiedniej metody rozłożenia potoków ruchu w sieci zależy od celu badania, specyfiki zagadnienia oraz uwarunkowań i organizacji ruchu w sieci. Również na tym etapie można sięgnąć po mniej lub bardziej złożone modele, wykorzystywane zarówno w metodach statycznych, jak i dynamicznych. Problem dynamicznego rozłożenia ruchu w sieci DTA, polegający na znalezieniu zmiennych w czasie potoków na odcinkach można rozwiązać w sposób analityczny [7] lub za pomocą narzędzi symulacyjnych [15, 30].

Optymalne, chwilowe rozłożenie potoku ruchu  $q_{ij}^*$  to takie, dla którego zachodzi [4]:

$$q_{ij}^* = \arg \min_{q_{ij}} F(A \cdot q_{ij}, \hat{q}_{ij}), \quad (1)$$

gdzie:

- $A$  - macierz zerowej macierzy rozłożenia ruchu w sieci,
- $q_{ij}$  - wartości modelowego rozłożenia potoków ruchu na sieć transportową,
- $\hat{q}_{ij}$  - zaobserwowane wartości natężenia ruchu na poszczególnych odcinkach sieci,
- $F$  - funkcja celu, określająca „odległość” pomiędzy charakterystykami ruchu,
- argmin - wartość punktu, dla którego funkcja celu osiąga wartość minimalną.

Po ustaleniu modelowego rozłożenia potoków w sieci następuje korekta macierzy podróży, aktualizacja funkcji celu oraz wyznaczenie wartości funkcji oporu na podstawie nowego teoretycznego natężenia ruchu. Zmiany te konieczne są do oceny zbieżności procesu obliczeniowego na podstawie obliczeniowych i empirycznych wartości natężeń na poszczególnych odcinkach analizowanej sieci transportowej. Jeżeli poziom zbieżności spełnia założone warunki, to można zakończyć proces obliczeniowy. W przeciwnym przypadku należy skorygować sposób ustalenia modelowego rozkładu ruchu. Może się to wiązać ze zmianą:

- wartości parametrów lub postaci funkcyjnej funkcji oporu,
- metody wyznaczania najkrótszych ścieżek w sieci,
- metody rozłożenia potoków ruchu,
- struktury sieci,
- innych czynników, wpływających na uzyskane rozwiązanie.

Proces obliczeniowy powtarzany jest dla kolejnego przedziału czasu, dla którego zaobserwowano wartości natężeń na odcinkach sieci.

#### 4. NARZĘDZIA INFORMATYCZNE WSPOMAGAJĄCE PROCES WYZNACZANIA DYNAMICZNEJ MACIERZY PODRÓŻY

Aby usprawnić wyznaczenie macierzy podróży  $P$ , opracowano oryginalną metodę wyznaczenia macierzy podróży w ujęciu dynamicznym. Proponowana metoda obliczeniowa jest rozszerzeniem algorytmu, przedstawionego w pracach [31, 32]. Aktualna wersja analizuje dowolną liczbę ścieżek pomiędzy parą węzłów  $(a, b) \in E$ , gdzie  $E$  jest zbiorem relacji (przy czym liczba ta może być różna dla każdej pary) w kolejnych interwałach  $t_i$ , dla  $i = 1, \dots, T$ .

Opracowany algorytm ma charakter iteracyjny i uwzględnia optymalny rozkład potoków ruchu w każdym kroku iteracyjnym. Ze względu na trudności związane z badaniem zgodności algorytmu w warunkach rzeczywistych, należy podkreślić, że ma on charakter przybliżony a ostateczna wartość funkcji celu zależy od par węzłów  $(a, b)$ , przyjętych do analizy w kolejnych krokach iteracyjnych. Metoda wymaga znajomości obciążeń wszystkich odcinków międzywęzłowych analizowanego fragmentu sieci.

Idea algorytmu opiera się częściowo na metodzie ograniczonych przepustowości, przy czym ograniczeniem nie są przepustowości, ale zaobserwowane obciążenia odcinków międzywęzłowych. W metodzie zakłada się, że uczestnicy ruchu wybierają najkrótszą czasowo ścieżkę, z uwzględnieniem aktualnego obciążenia. Jeżeli wybrana przez nich droga okazuje się jednak w dalszych interwałach przeciążona, mogą zmienić jej częściowy przebieg.

Funkcją celu jest minimalizacja odchyłeń pomiędzy wartościami potoków zaobserwowanych a uzyskanych w trakcie obliczeń.

Funkcja celu  $F(t_i)$ , określona dla każdego interwału  $t_i$ , wyznaczana jest jako różnica odchyłeń pomiędzy wartościami potoków zaobserwowanych a uzyskanych w trakcie obliczeń:

$$F(t_i) = \sum_{u \in L} |y_u^{(r)}(t_i)| \quad \forall i = 1, K, T, \quad (2)$$

gdzie:

- $u$  - numer odcinka międzywęzłowego,
- $L$  - zbiór wszystkich odcinków międzywęzłowych analizowanego fragmentu sieci,
- $y_u^{(r)}(t_i)$  - odchylenie wartości natężenia  $u$ -tego odcinka, wyznaczonej w kolejnej  $r$ -tej iteracji od wartości pomiarowej (lub założonej) w interwale  $t_i$ .

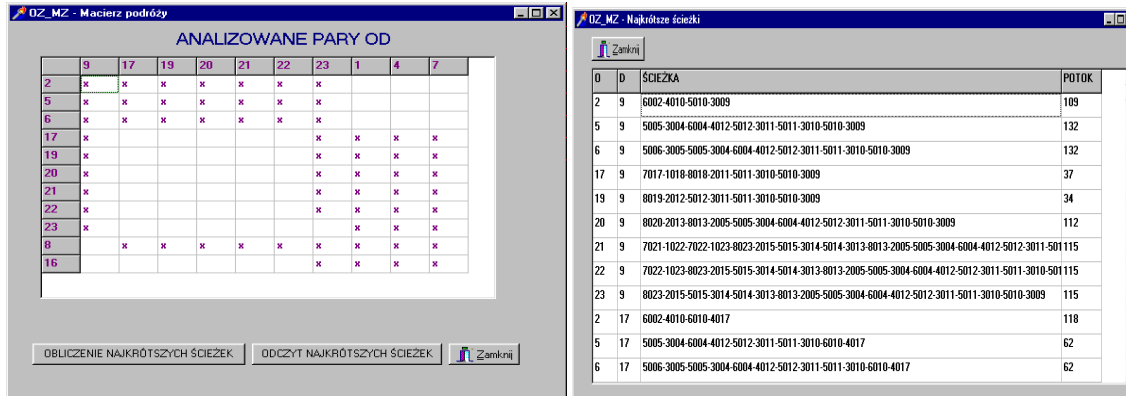
Optymalizacja polega na minimalizacji funkcji celu dla każdego interwału  $t_i$ , czyli na uzyskaniu takiej macierzy podróży  $OD$ , której rozkład na sieć prowadzi do największej zgodności z zaobserwowanymi wynikami.

Na podstawie oryginalnej metody opracowano pomocniczą aplikację komputerową OZ\_MZ. Program zawiera następujące formularze podstawowe:

- „OZ\_MZ - Menu”,
- „OZ\_MZ - Dane”,
- „OZ\_MZ - Macierz podróży”,
- „OZ\_MZ - Najkrótsze ścieżki”,
- „OZ\_MZ - Odchyłka”,
- „OZ\_MZ - Wyniki iteracji”,
- „OZ\_MZ - Macierz P”.

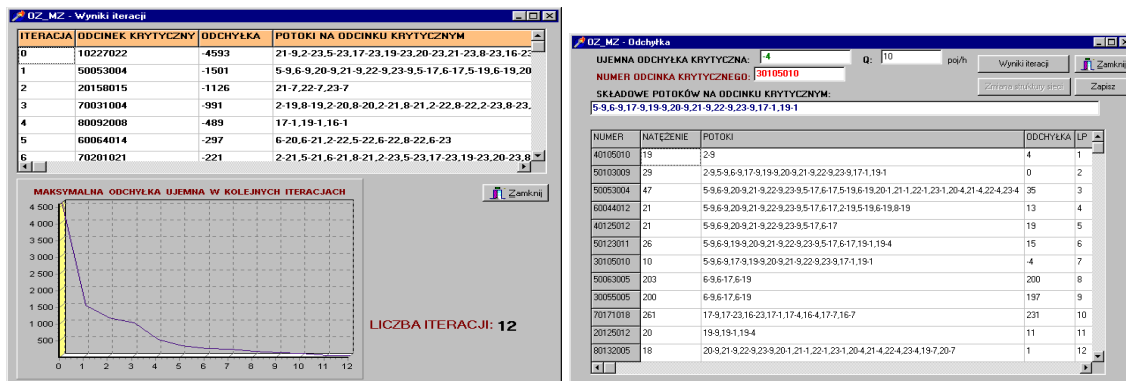
Uruchomienie aplikacji powoduje przejście do formularza głównego, gdzie wybierając odpowiednią opcję, można wczytać z odpowiedniej tablicy lub obliczyć czasy podróży dla wszystkich odcinków międzywęzłowych. Obliczenia opierają się na aktualizacji wszystkich parametrów przepustowościowych węzłów przy założonych natężeniach ruchu.

Po wczytaniu (lub obliczeniu) czasów podróży program umożliwia przegląd danych dla różnych poziomów agregacji analizowanej sieci transportowej oraz przejście do formularza „OZ\_MZ – Macierz podróży”, umożliwiającego zaznaczenie wybranych par węzłów  $(a, b) \in E$  oraz przejście do wyznaczania najkrótszych ścieżek w sieci. Widoki obu formularzy przedstawiono na rys.2.



Rys. 2. Widoki formularzy „OZ\_MZ – Macierz podróży” oraz „OZ\_MZ – Najkrótsze ścieżki”  
Fig. 2. Screens of forms „OZ\_MZ – Macierz podróży” and „OZ\_MZ – Najkrótsze ścieżki”

Po założeniu pewnej dokładności obliczeń, odpowiadającej wielkości  $\epsilon_1$ , można przejść do obliczenia minimalnej odchyłki ujemnej. Wyniki poszczególnych  $r$ -tych iteracji zamieszczono na formularzu „OZ\_MZ – Wyniki iteracji”. Ostateczne wartości natężeń na poszczególnych odcinkach międzywęzłowych wraz z wielkościami odchyłek od wartości pomiarowych oraz opisem potoków, korzystających z tych odcinków dla  $k$ -tej iteracji zamieszczono na formularzu „OZ\_MZ – Odchyłka”. Formularz ten umożliwia również zapis w tablicy wyników dla  $k$ -tej iteracji, zmianę struktury sieci przez usunięcie odcinków, dla których wartość odchyłki jest mniejsza niż założona dokładność  $\epsilon_1$ . Przykładowe widoki obu formularzy zamieszczono na rys. 3. Wynikowa macierz związków podróży  $P$  przedstawiona jest na formularzu „OZ\_MZ – Macierz P”.



Rys. 3. Widoki formularzy „OZ\_MZ – Wyniki iteracji” oraz „OZ\_MZ – Odchyłka”  
Fig. 3. Screens of forms „OZ\_MZ – Wyniki iteracji” and „OZ\_MZ – Odchyłka”



## 5. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano rozwój i charakterystykę metod wyznaczania macierzy podróży w sieciach miejskich z uwzględnieniem ich specyfiki oraz zastosowania. Szczególną uwagę poświęcono wyznaczaniu macierzy podróży na podstawie znajomości natężeń na odcinkach międzywęzłowych. Ten sposób, ze względu na możliwości zastosowania w problemach dynamicznych, może być wykorzystywany w efektywnym zarządzaniu ruchem.

Schematyczne ujęcie elementów składowych metod wyznaczania macierzy podróży ma na celu wyodrębnienie zagadnień bezpośrednio związanych z procesem obliczeniowym, które wpływają na dokładność uzyskanych macierzy podróży oraz ich zgodność z sytuacją rzeczywistą. W zależności od przyjętych modeli cząstkowych można otrzymać lepsze lub gorsze wyniki.

Aplikacja komputerowa opracowana na podstawie autorskiej koncepcji ma strukturę modułową, gdzie na etapie początkowym zastosowano proste modele cząstkowe. W dalszych badaniach należałoby rozbudować poszczególne części składowe i badać ich wpływ na zbieżność uzyskanych wyników z rzeczywistymi danymi. Cała aplikacja może być również częścią składową bardziej złożonego systemu zarządzania, wykorzystującego informację o aktualnym obciążeniu sieci do sterowania ruchem.

## Bibliografia

1. Ashok K., Ben-Akiva M.: Dynamic origin-destination matrix estimation and prediction for real-time traffic management systems. *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 12th ISTTT*. Elsevier, Amsterdam 1993.
2. Bagiński E., Litwińska E., Zipser T.: Próby symulacji modelowej rozkładu przestrzennego ruchu turystycznego w Polsce. *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 1995.
3. Bell M.G.H.: Log-linear models for the estimation of origin-destination matrices from traffic counts: an approximation. . *Transportation and Traffic Theory, Proceedings of the 9th ISTTT*. VNU Science Press, Utrecht 1984.
4. Bierlaire M.: The total demand scale: a New measure of quality for static and dynamic origin-destination trip tables. *Transportation Research*, 36 B (2002), p. 837-850.
5. Bierlaire M., Toint P.L.: MEUSE: an origin-destination estimator that exploits structure. *Transportation Research*, 29 B (1995), p. 47-60.
6. Cascetta E.: Estimation of trip matrices from traffic counts and survey data: a generalized least squares approach estimator. *Transportation Research*, 18 B (1984), p. 289-299.
7. Cascetta E., Cantarella G.E.: A day-to-day and within-day dynamic stochastic assignment model. *Transportation Research*, 25 A (1990), p. 277-291.
8. Cremer M., Keller H.: A New class of dynamic methods for the identification of origin-destination floks. *Transportation Research*, 21 B (1987), p. 117-132.
9. Kalić M., Teodorović D.: Trip distribution modelling using fuzzy logic and a genetic algorithm. *Transportation Planning and Technology*. Vol. 26, No. 3 (2003), p. 213-238.
10. Komar Z., Wolek Cz.: *Inżynieria ruchu drogowego - wybrane zagadnienia*. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1994.
11. Korzan B.: *Elementy teorii grafów i sieci. Metody i zastosowania*. WNT, Warszawa 1978.
12. Krystek R.: *Węzły drogowe i autostradowe*. WKiŁ, Warszawa 1998.
13. Li B., Moor B.: Recursive estimation based on the equality-constrained optimization for intersection origin-destination matrices. *Transportation Research*, 33 B (1999), p. 203-214.

14. Litwińska E.: Model of trip distribution and transport problems. *Prace Naukowe Instytutu Historii Architektury, Sztuki I Techniki Politechniki Wrocławskiej* nr 21/10. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1990.
15. Mahmassani H., Hu T., Peeta S., Ziliaskopoulos A.: development and testing of dynamic traffic assignment and simulation procedures for ATIS/ATMS applications. Technical Report DTFH61-90-R-00074-FG Center for Transportation Research, University of Texas at Austin 1993.
16. Nepal K.P., Park D.: Solving the median shortest path problem In the planning and design of urban transportation networks using a vector labeling algorithm. *Transportation Planning and Technology*. Vol. 28, No. 2 (2005), pp.113-133.
17. Nihan N.L., Davis G.A.: Recursive estimation of origin-destination matrices from input/output counts. *Transportation Research*, 21 B (1987), pp.149-164.
18. Podoski J.: *Transport w miastach*. WKiŁ, Warszawa 1985.
19. Seungkirl B., Hyunmyung K., Yongtaek L.: Multiple vehicle origin-destination matrix estimation from traffic counts using genetic algorithms. *Journal of Transportation Engineering*. Vol. 130 (2004), pp. 339-347.
20. Serali H.D., Arora N., Hobeika A.G.: Parameter optimisation methods for estimating dynamic origin-destination trip-tables. *Transportation Research*, 31 B (1997), pp. 141-157.
21. Serali H.D., Narayanan A., Sivanandan R.: Estimation of origin-destination trip-tables based on a partial set of traffic link volumes. *Transportation Research*, 37 B (2003), pp.815-836.
22. Serali H.D., Park T.: Estimation of dynamic origin-destination trip tables for a general network. *Transportation Research*, 35 B (2001), p. 217-235.
23. Serali H.D., Sivanandan R., Hobeika A.G.: A linear programming approach for synthesizing origin destination (O-D) trip-tables from link traffic volumes. *Transportation Research*, 28 B (1994), p. 213-233.
24. Spiess H.: A maximum likelihood model for estimating origin-destination matrices. *Transportation Research* 21 B (1987), p. 395-412.
25. Stathopoulos A., Tsekeris Th.: Methodology for validating dynamic origin-destination matrix estimation models with implications for Advanced Traveler Information Systems. *Transportation Planning and Technology*. Vol. 28, No.2 (2005), p. 93-112.
26. Steenbrink P.: *Optymalizacja sieci transportowych*. WKiŁ, Warszawa 1978.
27. Van Zuylem H.J., Willumsen L.G.: The most likely trip matrix estimated from traffic counts. *Transportation Research*, 14 B (1980), p. 281-293.
28. Yang H.: Heuristic algorithms for the bilevel origin-destination matrix estimation problem. *Transportation research*, 29 B (1995), p. 231-242.
29. Yang H. Sasaki T., Iida Y.: Estimation of origin-destination matrices from link traffic counts on congested networks. *Transportation Research*, 26 B (1992), p. 417-434.
30. Yang Q., Koutsopoulos H.: A microscopic traffic Simulator for evaluation of dynamic traffic management systems. *Transportation Research*, 4 C (1997), p. 113-129.
31. Żochowska R.: Wyznaczanie macierzy związków ruchowych w gęstych sieciach drogowych. *Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 44, Gliwice 2002*.
32. Żochowska R.: Wyznaczanie macierzy związków ruchowych w złożonych sieciach drogowych na podstawie znajomości natężeń na odcinkach międzywęzłowych. *Materiały konferencyjne II Konferencji Naukowo-Technicznej nt. „Systemy transportowe. Teoria i praktyka”, Zeszyty Naukowe Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 52, Gliwice 2004*.

Recenzent: Dr hab. inż. Romuald Szopa, Profesor Politechniki Częstochowskiej