

APARATURA BADAWCZA I DYDAKTYCZNA

Poszukiwanie optymalnej struktury sieci transportowej przy wykorzystaniu równoległego algorytmu genetycznego

ALEKSANDER KRÓL

POLITECHNIKA ŚLĄSKA, WYDZIAŁ TRANSPORTU, KATEDRA SYSTEMÓW INFORMATYCZNYCH
TRANSPORTU

STRESZCZENIE

Aktualna struktura sieci transportowej jest skutkiem długotrwałych procesów w przeszłości i jest bardzo prawdopodobne, że nie jest ona optymalna dla obecnych i przewidywanych potrzeb. Gdy wymagana jest modernizacja lub rozbudowa sieci transportowej z reguły rozpatruje się kilka konkurencyjnych projektów, natomiast struktura rozwiązania optymalnego nie jest znana. Wynika stąd potrzeba opracowania metody znajdującej optymalną sieć transportową przy danych założeniach. Dane wejściowe dla tego problemu nie mogą być zadane w postaci analitycznej, naturalne jest zatem zaproponowanie algorytmu genetycznego jako narzędzia optymalizacyjnego. Charakterystyczną właściwością algorytmu genetycznego jest niezależne wykonywanie obliczeń dla wielu podobnych do siebie obiektów, więc wprowadzenie przetwarzania równoległego istotnie zmniejsza czas potrzebny do otrzymania rozwiązania.

Search for the optimal structure of transportation network using parallel genetic algorithm

ABSTRACT

The current transportation network structure is usually a result of historically long adaptation process and probably it is not optimal for present and future transportation needs. When a modernisation or expansion is required only a few competing designs are evaluated, but the structure of the optimal solution remains unknown. So, there is a need of introduction of a method searching for optimal transportation network structure. The input data for the optimisation problem cannot be entered in analytical form, so it is natural to propose a genetic algorithm for performing the task. A specific feature of genetic algorithm is independent executing of calculations for many similar objects, so introducing of parallel processing significantly reduces the time needed.

1. SIECI TRANSPORTOWE I ICH EWOLUCJA

Sieć transportowa służy zaspokojeniu komunikacyjnych potrzeb ludności ukierunkowanych na różne punkty docelowe i różne kierunki. Sieć transportowa to układ połączeń na danym obszarze ukształtowany pomiędzy skupiskami ludności w wyniku interakcji czynników ekonomicznych i społecznych oraz środowiska naturalnego [1]. Obecna postać sieci transportowej jest wynikiem długotrwałego rozwoju, który rozpoczął się w początkach osadnictwa na danym obszarze.

Gdy na pewnym etapie rozwoju historycznego zachodziła potrzeba rozbudowy lub modernizacji sieci zawsze dążono do zaspokojenia chwilowych potrzeb bazując oczywiście na dotychczasowej strukturze sieci. Ponieważ bardzo często owe chwilowe potrzeby wynikały z różnych, nierzadko przypadkowych przyczyn (gospodarczych, politycznych, demograficznych, związanych ze zmianami środowiska naturalnego), które z biegiem czasu przestawały być aktualne obecna struktura sieci z reguły nie jest optymalna.

2. OPTIMALIZACJA SIECI TRANSPORTOWYCH

W chwili obecnej obserwuje się gwałtowny wzrost komunikacyjnych potrzeb ludności związany z intensyfikacją rozwoju gospodarczego, wzrostem zamożności społeczeństwa oraz urbanizacją nowych terenów. W takiej sytuacji, gdy wymagana jest modernizacja lub rozbudowa sieci transportowej z reguły rozpatruje się kilka konkurencyjnych projektów i następnie wybiera jeden z nich. Jako kryterium rozpatruje się łączne koszty rozbudowy i koszty użytkowania sieci transportowej. Taka procedura nie gwarantuje znalezienia rozwiązania optymalnego, gdyż tylko niewielki ułamek przestrzeni wszystkich możliwości jest poddany analizie.

Podejściem alternatywnym jest opracowanie metody pozwalającej na znalezienie optymalnej struktury sieci transportowej na rozpatrywanym obszarze przy zadanych potrzebach komunikacyjnych i porównanie jej z istniejącą siecią. Pozwoliło by to na opracowanie wytycznych dla wymaganych modernizacji [2]. Prognozując różne warianty przyszłego rozwoju potrzeb transportowych można na drodze symulacji poszukiwać różnych rozwiązań i do realizacji wybrać to, które obiecuje długoterminowe zaspokojenie tych potrzeb przy akceptowalnych kosztach.

3. POSZUKIWANIE METODY OPTIMALIZACYJNEJ

Ze względu na to, że dane wejściowe dla tego problemu (charakteryzujące środowisko naturalne, rozkład skupisk ludności oraz intensywność komunikacji pomiędzy nimi) z reguły nie mogą być zadane w postaci analitycznej, naturalne jest zaproponowanie metod sztucznej inteligencji jako narzędzi optymalizacyjnych. Dzięki takiemu podejściu można znaleźć rozwiązanie zbliżone do optymalnego w stosunkowo krótkim czasie, eksplorując jedynie znikomą część przestrzeni rozwiązań. Najbardziej odpowiednie wydają się być procedury wykorzystujące algorytmy genetyczne [3].

Mimo, że w Polsce nie ma znaczących publikacji poruszających tę lub podobną problematykę, to wiele prac pochodzi przede wszystkim z krajów, które weszły w okres gwałtownego rozwoju. W większości prac podejmujących problem optymalizacji sieci transportowej zakładano istnienie regularnego zbioru punktów o stałych współrzędnych. Procedura optymalizacyjna sprowadzała się do wyboru par połączonych węzłów. Połączenia były zwykłymi odcinkami prostych. Taka struktura sieci transportowej może być łatwo kodowana przez sekwencję 1 i 0. Każda 1 oznacza, że połączenie istnieje, każde 0 oznacza brak połączenia [2, 4, 5]. Jako minimalizowaną funkcję celu powszechnie przyjmuje się koszty użytkowania sieci transportowej, dodatkowo minimalizuje się koszty budowy lub rozbudowy albo wprowadza się ograniczony budżet [6]. W niektórych pracach poszukiwano nie tylko optymalnej struktury, ale projektowano rozwój sieci transportowej w kolejnych etapach czasowych. W tym podejściu zostały wprowadzone częściowe budżety [7].

W żadnej z prac nie uwzględniono w bezpośredni sposób zależności kosztów budowy i rozbudowy sieci transportowej od szczegółów lokalnej topografii, środowiska naturalnego oraz zastanej infrastruktury. Topologia optymalizowanej sieci transportowej była w dużym stopniu zdeterminowana przez istnienie statycznego zbioru węzłów. W proponowanym tutaj rozwiązaniu wprowadzono mapę kosztów budowy, gdzie każdemu punktowi można przypisać inną wartość [8]. Jako podstawowe przyjęto założenie, że sieć transportowa jest obiektem, który w trakcie optymalizacji może zmieniać swoją strukturę całkowicie dowolnie [9].

4. ALGORYTM GENETYCZNY JAKO METODA OPTIMALIZACJI SIECI TRANSPORTOWEJ

Metody optymalizacyjne z użyciem algorytmów genetycznych naśladują proces ewolucji w świecie żywym i oparte są o następujące założenia [3]:

- konkurują ze sobą różne wersje rozwiązania (osobniki)
- struktura każdego osobnika zdeterminowana jest przez ciąg genów - genotyp
- genotyp podlega przypadkowym zmianom (mutacje)
- losowo wybrane pary osobników mogą wymienić między sobą fragmenty genotypów (krzyżowanie, crossover)
- funkcja dostosowania, będąca miarą dostosowania określa prawdopodobieństwo przejścia do następnego pokolenia (nacisk selekcyjny)
- połączenie przypadkowych mutacji i krzyżowania z ukierunkowanym naciskiem selekcyjnym prowadzi ku optymalnemu rozwiązaniu.

Sieć transportowa jest reprezentowana jako graf, którego gałęzie odpowiadają połączeniom, a wierzchołki skrzyżowaniom połączeń. W trakcie procesu optymalizacji modyfikowana jest zarówno topologia grafu – dodawane i usuwane są gałęzie i wierzchołki, jak i współrzędne wierzchołków oraz kształt połączeń. Założono dodatkowo, że połączenia mogą mieć przypisany dodatkowy atrybut – klasę, również podlegający optymalizacji. Niektóre z wierzchołków sieci są wyróżnione i nie podlegają modyfikacji – odpowiadają rzeczywistym miastom.

Funkcją celu minimalizowaną w procesie optymalizacji jest sumaryczny koszt budowy sieci transportowej i koszt jej użytkowania. Oba składniki są rozpatrywane w odpowiednio długim okresie, tak aby przy uwzględnieniu amortyzacji możliwe było ich porównanie.

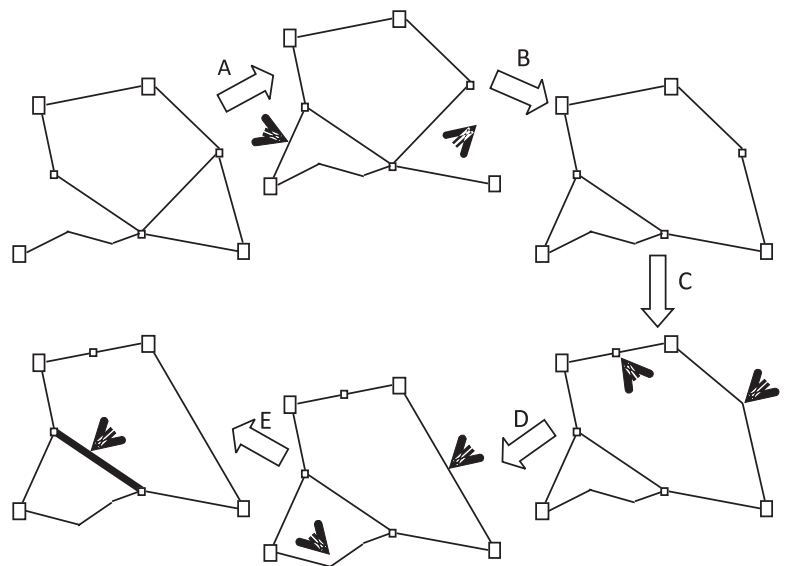
Proces optymalizacji rozpoczyna się od utworzenia populacji początkowej zawierającej dowolne osobniki, następnie ich genotypy podlegają losowym mutacjom i krzyżują się między sobą. W kolejnym etapie wyliczane są funkcje dostosowania dla każdego osobnika. Funkcja dostosowania jest odwrotnością sumarycznych kosztów budowy i użytkowania sieci transportowej. Następnie drogą losowania tworzone jest następne pokolenie, prawdopodobieństwo przejścia osobnika do następnego pokolenia jest proporcjonalne do wartości funkcji dostosowania. Po osiągnięciu zadanej liczby pokoleń lub osiągnięciu

zadanej wartości funkcji dostosowania proces optymalizacji zostaje zatrzymany [9].

4.1. Genotyp kodujący sieć transportową, operatory mutacji i krzyżowania

Ponieważ sieć transportowa jest obiektem złożonym i zmieniającym dowolnie strukturę w procesie ewolucji jej genotyp nie może być liniowym ciągiem bitów. Graf reprezentujący sieć transportową jest zakodowany w postaci macierzy przyległości wierzchołków. Genotyp zawiera ponadto dla każdego połączenia ciąg liczb rzeczywistych kodujące jego kształt oraz liczbę całkowitą kodującą jego klasę.

Mutacje polegają na losowych zmianach genotypu. W związku z złożoną strukturą genotypu zastosowano kilka różnych operatorów mutacji (przykłady przedstawiono na Rys. 1):

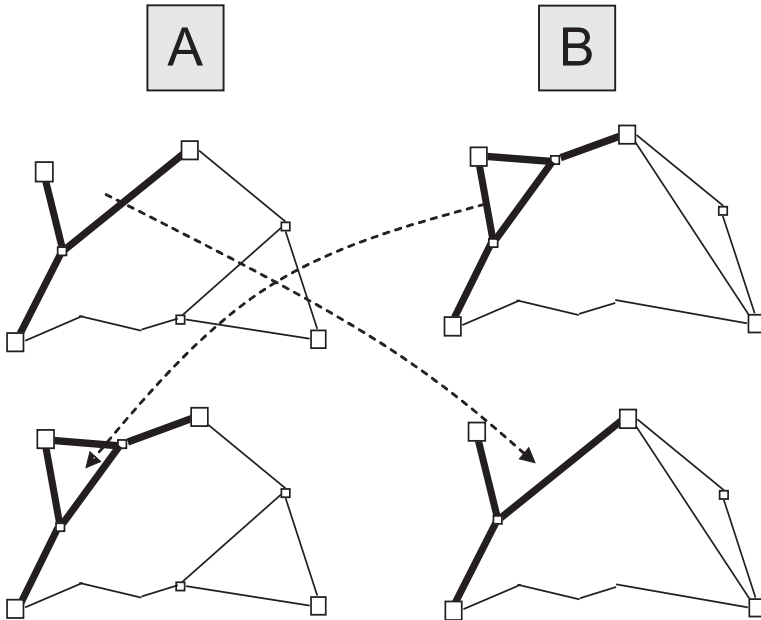


Rysunek 1. Przykładowe mutacje [8]

- A. zmiana wartości elementów macierzy przyległości odpowiada za dodawanie i usuwanie połączeń
- B. w szczególności wartość może przeskoczyć do następnego elementu macierzy – jedno z istniejących połączeń zostaje związane z innym węzłem
- C. wstawianie i usuwanie kolumn w macierzy przyległości odpowiada za dodawanie i usuwanie węzłów sieci, przy czym “miasta” nie mogą zostać usunięte
- D. zmiana liczby punktów połączeń i ich współrzędnych odpowiada za zmianę kształtu połączenia
- E. zmiana klasy połączenia.

Również operatory krzyżowania nie mogą działać całkowicie przypadkowo i wymieniać dowolnych części genotypu, gdyż prowadziłyby do powstania nieprawidłowych genotypów nie kodujących żadnych sieci. Problem ten został rozwiązany przez wprowadzenie

procedur wyszukiwujących w grafie autonomicznych fragmentów rozpiętych pomiędzy takimi samymi podzbiórami miast. Jeśli uda się znaleźć zbiór analogicznych takich fragmentów dla dwóch osobników kandydujących do krzyżowania, to podlegają one losowej wymianie. Proces ten został przedstawiony na Rysunku 2.



Rysunek 2. Krzyżowanie się osobników [8]

4.2. Wyznaczanie funkcji dostosowania

Jako wartość funkcji dostosowania osobnika przyjęto odwrotność sumarycznych kosztów budowy i użytkowania sieci. Dodatkowo wprowadzono wykładnik modyfikujący wartość funkcji przystosowania. Zmiana tego wykładnika powoduje wyostanie lub spłaszczenie funkcji przystosowania, w ten sposób można korygować szanse osobników aktualnie gorzej dostosowanych. Domyślna wartość tego wykładnika $q = 2$.

$$f_f = \frac{1}{(K_B + K_U)^q} \quad (1)$$

gdzie: K_B – koszt budowy,
 K_U – koszt użytkowania.

Zmienne koszty budowy, zależne od szczegółów środowiska naturalnego lub zastanej infrastruktury mogą być przedstawione w postaci mapy – „pola kosztów”. Dogodnym sposobem wprowadzenia tych danych jest użycie mapy bitowej w odcieniach szarości. Wartości pikseli wzdłuż połączenia reprezentują lokalny modyfikator kosztu budowy: biały piksel (wartość 0xFF) odpowiada kosztowi zerowemu, czarny (wartość 0x00) odpowiada kosztowi maksymalnemu. Rozkład kosztów może być dodatkowo

modyfikowany przez wykładnik (p , domyślnie $p = 1$). Klasa połączenia jest uwzględniona poprzez właściwy współczynnik ($k_b[cl]$). Koszt budowy pojedynczego połączenia może być więc wyrażony jako:

$$K_{bi} = D_i k_b[cl] \sum_{i=1}^n \frac{1}{n} (0xFF - g_i)^p \quad (2)$$

gdzie: D_i – długość połączenia,
 n – liczba pikseli wzdłuż połączenia.

Dużo trudniejszym zagadnieniem jest wyliczenie kosztów użytkowania sieci na podstawie macierzy intensywności ruchu. Koszt użytkowania połączenia przez jeden pojazd zależy od aktualnego obciążenia. Zależność ta może być modelowana w różny sposób, tutaj przyjęto, że koszt ten jest proporcjonalny do czasu zużytego na pokonanie danego odcinka. Do obliczenia czasu podróży zastosowano formułę wprowadzoną przez US Bureau of Public Roads [10]:

$$K_{uj} = D_i k_u[cl] \left(1 + \alpha \left(\frac{O_i}{g[cl]} \right)^\beta \right) \quad (3)$$

gdzie: D_i – długość połączenia,
 $k_u[cl]$ – koszt jednostkowy w ruchu swobodnym w zależności od klasy,
 O_i – obciążenie połączenia,
 $g[cl]$ – obciążenie graniczne (przepustowość) w zależności od klasy,
 α, β – parametry kalibracyjne.

W celu minimalizacji kosztów podróży nie wszystkie pojazdy pokonujące trasę pomiędzy dwoma wybranymi wierzchołkami sieci korzystają z drogi potencjalnie najkrótszej lub najtańszej – wybierają drogę w zależności od aktualnego obciążenia i spodziewanego czasu przejazdu. Wyznaczenie rozkładu strumieni ruchu pomiędzy drogi alternatywne jest zatem złożonym podzadaniem optymalizacyjnym [2, 11, 12].

Strumienie ruchu są rozdzielane w sieci transportowej przy przyjęciu systemu normatywnego: żądane jest aby sumaryczne koszty ponoszone przez wszystkich podróżnych były jak najmniejsze. Podstawowym problemem jest tu określenie zbioru dróg alternatywnych. Z reguły spośród wielu możliwych dróg pomiędzy dwoma rozpatrywanymi węzłami zaledwie kilka ma praktyczne znaczenie. Przyjęto zatem upraszczające założenie, że uwzględniane będą tylko te drogi, które w istotny sposób odciążają drogę najtańszą.

W pierwszym kroku zakłada się, że pojazdy wybierają drogę najtańszą, wyznaczoną za pomocą algorytmu Dijkstry. Jeśli sumaryczne obciążenie któregoś z po-

łączeń jest większe od jego obciążenia granicznego poszukiwana jest droga alternatywna, omijająca to połączenie. Ponieważ zależność kosztów podróży od obciążenia jest nieliniowa strumienie pojazdów są rozdzielane pomiędzy różne drogi za pomocą metody symulowanego wyżarzania. Proces ten jest powtarzany aż osiągnięcia stanu, gdy żadne z obciążeń granicznych nie jest przekroczone lub graf staje się niespójny.

4.3. Przetwarzanie równoległe

Procedura rozdziału potoków ruchu na sieć jest bardzo czasochłonna i dla złożonych zadań z rzeczywistymi danymi stanowi gros czasu obliczeniowego procesora. Czas potrzebny tutaj zwiększa się wraz ze wzrostem natężeniem ruchu, gdyż wtedy częściej zachodzi potrzeba rozważania dróg alternatywnych. Wykonanie obliczeń na typowym komputerze PC na testowych zestawach danych zajmowało od kilku minut (dla zbioru 7 miast przy bardzo małym natężeniu ruchu) do kilkudziesięciu godzin (dla zbioru 13 miast przy bardzo dużym natężeniu ruchu). W Tabeli 1 zestawiono czasy potrzebne na wykonanie 1000 iteracji. Obliczenia wartości funkcji dostosowania są przeprowadzane dla każdego osobnika w populacji niezależnie, a więc mogą być przeprowadzone

Tabela 1. Czasy realizacji podstawowych faz algorytmu genetycznego dla 1000 iteracji

Przypadek	Obliczenie funkcji dostosowania osobników, T_{fd} [s]	Pozostałe operacje algorytmu genetycznego, T_o [s]	T_{fd} / T_o	$T_{fd} + T_o$ [s]
7 miast, mały ruch	89,14	24,04	3,71	113,18
7 miast, duży ruch	1024,80	61,05	16,79	1085,85
13 miast, duży ruch	7875,14	129,53	60,80	8004,67

równocześnie. Zrównoleglenie obliczeń funkcji dostosowania osobnika jest więc oczywistą metodą przyspieszenia działania algorytmu genetycznego. Istnieje wiele metod implementacji przetwarzania równoległego, niektóre z nich wymagają specjalnych narzędzi używanych do tworzenia oprogramowania. Poniżej przedstawiono prosty mechanizm przetwarzania rozproszonego oparty na mechanizmach dostępu do plików w lokalnej sieci komputerowej. Mechanizm ten nie wymaga używania żadnych zaawansowanych technik programistycznych. Prezentowana koncepcja wymaga współdziałania dwóch typów programów:

- pojedynczego serwera, realizującego zasadniczą część algorytmu genetycznego (generowanie populacji, mutacje i krzyżowanie)
- dowolnej liczby klientów, których jedynym zadaniem jest dokonanie oceny (obliczenie funkcji dostosowania) pojedynczego osobnika.

W każdym kroku iteracji – dla każdego nowego pokolenia, zakończywszy przetwarzanie pokolenia poprzedniego serwer po wykonaniu operacji mutacji i krzyżowania dysponuje genotypami każdego osobnika w populacji. Genotyp każdego osobnika zostaje zapisany w oddzielnym pliku w ustalonym folderze roboczym. Nazwa pliku jednoznacznie zawiera identyfikator pokolenia i osobnika, rozszerzenie nazwy pliku określa zawartość – genotyp. Pliki na czas zapisu są tworzone i otwierane w trybie wyłącznego dostępu.

Programy – klienci mogą być uruchomione na tym samym lub innym komputerze, jedynym warunkiem jest uprawnienie do zapisu i odczytu we wspólnym folderze roboczym. Każdy klient skanuje ten folder w poszukiwaniu plików z genotypem (identyfikowanych po rozszerzeniu) o niezerowej długości. Jeśli takie pliki zostaną znalezione, to klient usiłuje je kolejno otworzyć do odczytu w trybie wyłączności. Jeśli otwarcie się nie powiedzie oznacza to, że plik jeszcze nie został przygotowany przez serwer albo inny egzemplarz klienta już rozpoczął jego przetwarzanie. Jeśli plik zostaje otwarty, to pozostaje zablokowany dla innych klientów, a klient otwierający czyta genotyp i wylicza wartość funkcji dostosowania. Po zakończeniu obliczeń klient zapisuje wynik (pojedynczą liczbę rzeczywistą) do pliku o takiej samej nazwie jak plik wejściowy, ale innym (określającym wynik) rozszerzeniu. Gdy te operacje zakończą się sukcesem, plik z danymi wejściowymi (genotypem) jest zerowany, zamykany i kasowany.

Kasowanie pliku wejściowego zapobiega ponownemu przetwarzaniu przez innego klienta. Ze względu na specyfikę operacji na plikach tylko zamknięty plik może być skasowany, ale może zdarzyć się tak, że pomiędzy zamknięciem pliku a jego skasowaniem plik będzie przechwycony przez innego klienta – stąd zerowanie pliku przed zamknięciem i warunek poszukiwania plików tylko o niezerowej długości. Serwer po zapisaniu plików zawierających genotypy wszystkich osobników danego pokolenia oczekuje na rezultaty obliczeń i skanuje folder roboczy w poszukiwaniu plików z wynikami. W nazwie pliku zawarty jest identyfikator osobnika, zatem odczytany z pliku wynik jest jednoznacznie kojarzony z właściwym genotypem. Ponieważ w trakcie zapisu wyniku klient otwiera plik wyjściowy również w trybie wyłącznym

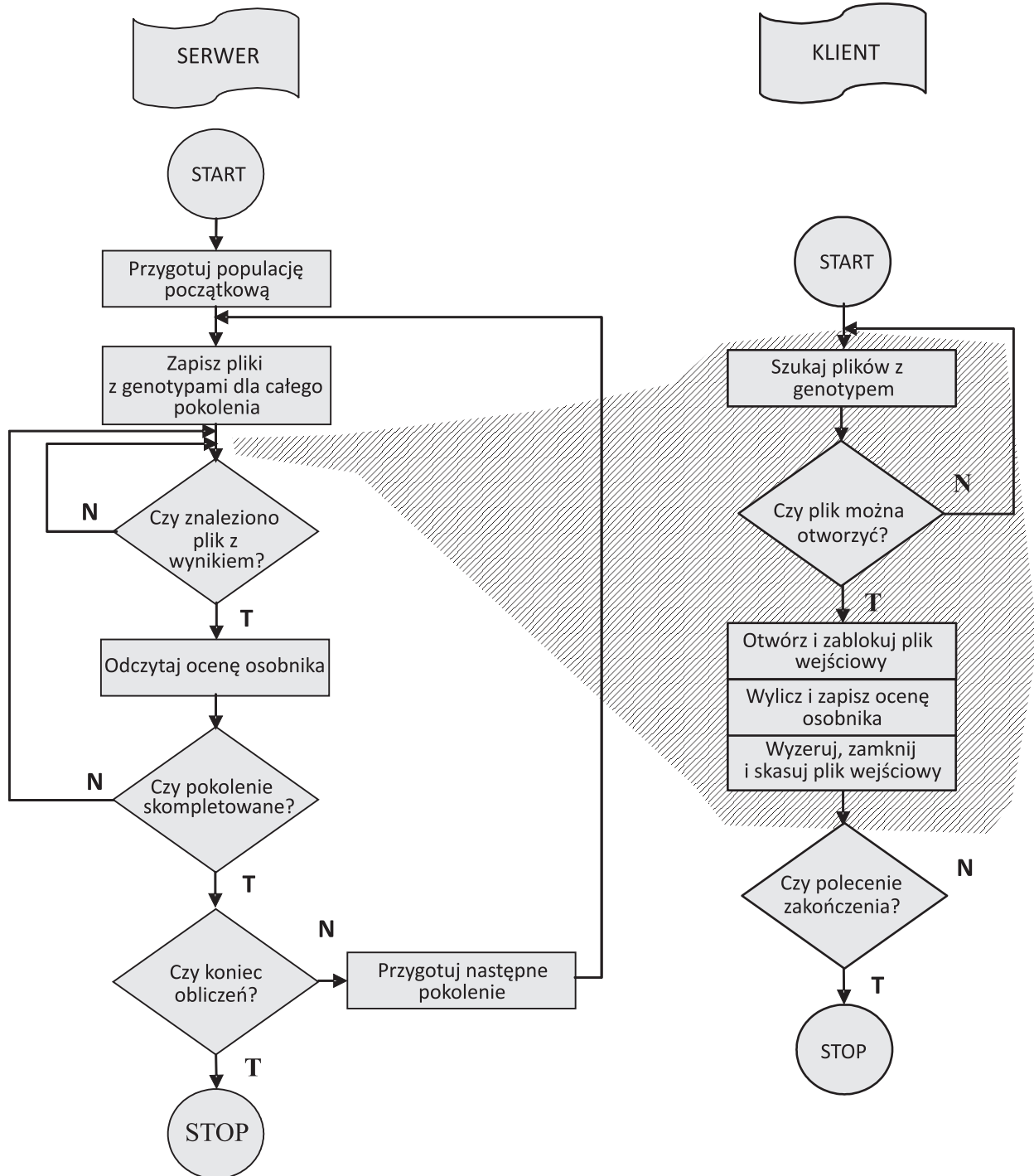
nie istnieje niebezpieczeństwo odczytu przez serwer niekompletnych danych. Po odczycie plik z wynikiem jest kasowany. Serwer jest w trybie czekania na rezultaty tak długo, aż zostaną skompletowane oceny dla całego pokolenia. Następnie przygotowywana jest następna iteracja

Jeśli z jakichkolwiek przyczyn połączenie sieciowe pomiędzy komputerem, gdzie uruchomiony jest klient a serwerem zostanie przerwane plik z genotypem zostaje odblokowany przez system operacyjny i może

być powtórnie przetworzony przez innego klienta. Taka sama sytuacja zachodzi, gdy działanie klienta zostaje przerwane w trakcie obliczeń.

5. REZULTATY

Przeprowadzono szereg symulacji dla zadań o różnym stopniu złożoności porównując oba tryby pracy. Ponieważ przekazywanie danych pomiędzy aplikacjami



Rysunek 3. Schemat równoległego wyliczania wartości funkcji dostosowania

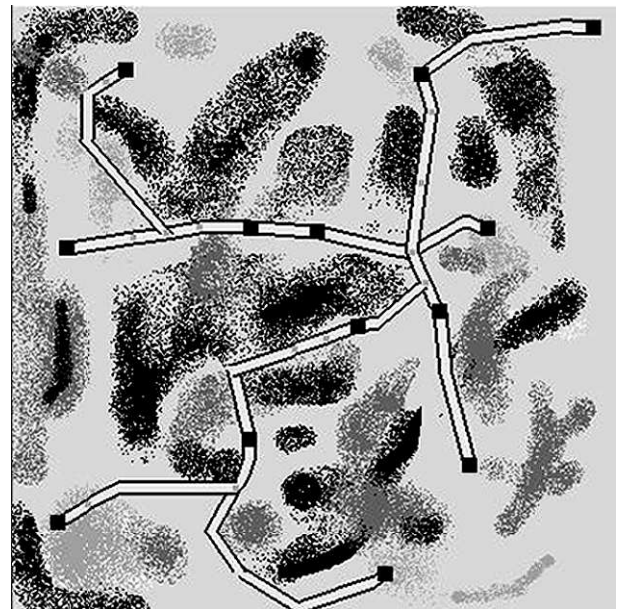
wymaga stosunkowo czasochłonnych operacji dyskowych przewaga przetwarzania równoległego zaczyna być istotna dla zadań, w których poszukiwana jest sieć transportowa łącząca co najmniej kilkanaście miast. W trybie pracy z przetwarzaniem równoległym również zmierzono czasy wykonywania kolejnych faz algorytmu genetycznego dla 1000 iteracji. W obliczeniach wartości funkcji dostosowania brało udział 10 klientów. Wyniki umieszczono w Tabeli 2. Ze względu na dość duże różnice w mocy obliczeniowej komputerów, na których uruchomiono klientów nie można dokonać dokładnego porównania z danymi

Tabela 2. Czasy realizacji podstawowych faz algorytmu genetycznego dla 1000 iteracji (wersja z przetwarzaniem równoległym)

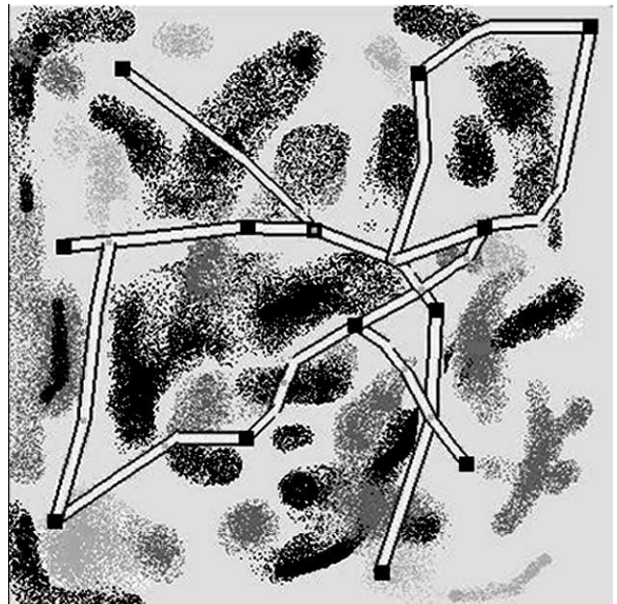
Przypadek	Obliczenie funkcji dostosowania osobników, T_{fd} [s]	Pozostałe operacje algorytmu genetycznego, T_0 [s]	T_{fd} / T_0	$T_f + T_0$ [s]
7 miast, duży ruch	196,39	220,55	0,89	416,95
13 miast, duży ruch	516,80	302,66	1,71	819,46

otrzymanymi dla trybu standardowego. Mimo to widać istotne korzyści w przypadku złożonych zadań - uzyskano nawet około dziesięciokrotne przyspieszenie obliczeń. Wprowadzenie większej liczby klientów nie zmniejszy już znacząco czasu obliczeń, gdyż czas potrzebny na obliczenie funkcji dostosowania staje się porównywalny z czasem pozostałych operacji. Przedstawiony mechanizm mimo swojej prostoty jest bardzo skuteczny i prowadzi do zmniejszenia czasu obliczeniowego o czynnik równy w przybliżeniu liczbie klientów w systemie. Z drugiej strony uruchomienie zbyt dużej liczby klientów nie przynosi spodziewanych rezultatów gdyż w takim wypadku klienci większość czasu zużywają konkurując ze sobą w fazie poszukiwania dostępnego pliku z genotypem. Z przeprowadzonych obserwacji wynika, że liczba klientów powinna być rzędu kilkunastu, dobrana tak, aby liczba osobników w pokoleniu stanowiła w przybliżeniu jej wielokrotność.

Zastosowanie prezentowanego algorytmu w wersji z przetwarzaniem równoległym pozwoliło na wygenerowanie przykładowych sieci transportowych dla stosunkowo złożonych, fikcyjnych zestawów danych. Stopień złożoności badanych przypadków jest już zbliżony do tego, jakiego należałoby oczekiwać dla zadań rzeczywistych. Przykładowe rozwiązania przedstawiono na Rysunkach 4-5.



Rysunek 4. Sieć transportowa wygenerowana dla dużego natężenia ruchu na obszarze o zróżnicowanej topografii



Rysunek 5. Sieć transportowa wygenerowana dla bardzo dużego natężenia ruchu (10 razy większego) na obszarze o zróżnicowanej topografii

6. PODSUMOWANIE

W pracy przedstawiono metodę poszukiwania sieci transportowej optymalnej dla analizowanego obszaru przy zadanych potrzebach transportowych. Zastosowanie algorytmu genetycznego w wersji z przetwarzaniem równoległym pozwala na uzyskanie wyników w akceptowalnym czasie. Przy tak dużym przyspieszeniu obliczeń możliwe jest wygenerowanie kilku alternatywnych projektów przy zmienionych założeniach. Pozwoli to na zbadanie stabilności uzyskanego rozwiązania – na sprawdzenie, czy niewielka

zmiana założeń nie spowoduje całkowitej zmiany struktury znalezionej sieci.

Jest bardzo prawdopodobne, że przy danych założeniach istnieje więcej niż jedno rozwiązanie optymalne, lub istnieją rozwiązania tylko nieco gorsze od optymalnego. Możliwe jest też, choć z dużo mniejszym prawdopodobieństwem, że znalezione rozwiązanie odpowiada jednemu z tych maksimów

lokalnych. Dalszy rozwój prezentowanego algorytmu będzie miał na celu umożliwienie jednoczesnego znajdowania wszystkich najważniejszych maksimów. To będzie również naśladowanie procesów w świecie ożywionym, gdyż w takim samym środowisku można napotkać różne gatunki reprezentujące maksima o zbliżonych wartościach funkcji dostosowania.

LITERATURA

- [1] Ratajczak M., Modelowanie sieci transportowych, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań 1999.
- [2] Pinninghoff M., Contreras R., Atkinson J., Using Genetic Algorithms to Model Road Network, IEEE Computer Society (2008).
- [3] Arabas J., Wykłady z algorytmów ewolucyjnych, WNT, Warszawa 2004.
- [4] Drezner Z., Wesolowsky G. O., Network design: selection and design of links and facility location, Transportation Research Part A 37 (2003) 241-256.
- [5] Zhang G., Lu J., Xiang Q., Application of Genetic Algorithm to Network Design Problem, 2008 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation.
- [6] Feng Ch., Lin J., Using a genetic algorithm to generate alternative sketch maps for urban planning, Computers Environment and Urban Systems 23 (1999) 91-108.
- [7] Morcousa G., Lounisb Z., Maintenance optimization of infrastructure networks using genetic algorithms, Automation in Construction 14 (2005) 129-142.
- [8] Król A., Pamuła T., Application Of Genetic Algorithm For Designing A Transportation Network With Varying Construction Costs, proc. of Int. Conf. "AI-METH'2009", Silesian University of Technology, Gliwice (2009), pp. 179-187.
- [9] Król A., Pamuła T., A Genetic Algorithm For The Design Of An Optimal Transportation Network, Proc. Int. Conf. „Tele-matics, Logistics and Transport Safety”, Silesian University of Technology, (2009), ISBN: 83-923434-2-5, pp. 75-81.
- [10] US Department of Transportation, Traffic Assignment, Washington 1973.
- [11] Gen M., Altıparmak F., Lin L., A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding, OR Spectrum 28: 337-354 (2006).
- [12] Kim B. J., Kim W., Song B. H., Sequencing and scheduling highway network expansion using a discrete network design model, Ann Reg Sci (2008) 42: 621-642.