

**PROJEKTOWANIE ROZBUDOWY  
SIECI TRANSPORTOWYCH  
ZA POMOCĄ ALGORYTMU EWOLUCYJNEGO**  
DESIGNING DEVELOPMENT OF TRANSPORTATION  
NETWORKS WITH THE USE  
OF AN EVOLUTIONARY ALGORITHM

**Aleksander Król**

Katedra Systemów Informatycznych Transportu, Wydział Transportu,  
Politechnika Śląska

**Słowa kluczowe: algorytm ewolucyjny, optymalizacja sieci transportowych, metody sztucznej inteligencji**

Keywords: evolutionary algorithm, optimization of transportation network, artificial intelligence methods

### **Sieci transportowe i ich ewolucja**

Sieć transportowa to układ połączeń na danym obszarze ukształtowany pomiędzy skupiskami ludności w wyniku interakcji czynników ekonomicznych i społecznych oraz środowiska naturalnego (Ratajczak, 1999). 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 przestały być aktualne, obecna struktura sieci zazwyczaj nie jest optymalna.

Również obecnie, gdy wymagana jest modernizacja lub rozbudowa sieci transportowej, z reguły punktem wyjścia rozpatrywanych projektów jest aktualna struktura sieci transportowej. Tylko w niewielu przypadkach projektanci są w tak komfortowej sytuacji, że mogą zignorować dotychczasową sieć transportową i rozpatrywać swoje koncepcje tylko w kontekście obecnych i prognozowanych potrzeb transportowych. Sytuacja taka ma miejsce obecnie przede wszystkim w krajach dokonujących skoku cywilizacyjnego, jak na przykład Chiny, gdzie powstają wielkie miasta połączone siecią autostrad o wysokim standardzie (Feng, Lin, 1999). W większości typowych sytuacji projekty rozbudowy muszą jednak w dużym stopniu nawiązywać do obecnej struktury sieci transportowej.

Ze względu na złożoność problemu i prawdopodobne istnienie kilku wariantów sieci spełniających żądane wymagania, typowa procedura wyboru jednego spośród kilku przedstawionych projektów nie może być uznana za satysfakcjonującą.

W podejściu alternatywnym wykorzystywane są różne metody, pozwalające na bardziej wydajne przeszukanie przestrzeni rozwiązań i w efekcie na znalezienie wariantów optymalnej struktury sieci transportowej na rozpatrywanym obszarze, przy zadanych potrzebach komunikacyjnych. Następnym krokiem jest porównanie ich z istniejącą siecią i opracowanie wytycznych dla wymaganych modernizacji (Król, Pamuła, 2009; Pinninghoff, Contreras, Atkinson, 2008).

Podejście to można naturalnie rozwinąć – dysponując metodą pozwalającą na łatwe modelowanie sieci transportowej można stan obecny wprowadzić jako dane wejściowe i w wyniku optymalizacji otrzymać rozwiązanie lub rozwiązania bazujące na aktualnej strukturze sieci.

## Wybór metody optymalizacyjnej

Ze względu na fakt, że dane wejściowe dla rozpatrywanego 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 znikomy fragment przestrzeni rozwiązań. Bardzo obiecujące wydają się być procedury wykorzystujące algorytmy genetyczne (Drezner, Wesolowsky, 2003; Gen, Altiparmak, Lin, 2006).

## Zastosowanie algorytmu genetycznego do optymalizacji struktury sieci transportowej

Metody optymalizacyjne z użyciem algorytmów genetycznych naśladują proces ewolucji w świecie ożywionym i oparte są o następujące założenia (Arabas, 2004):

- 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.

Metoda optymalizacyjna oparta na algorytmie genetycznym pokonuje zasadniczy problem zagadnień optymalizacyjnych – dąży do maksimum globalnego, nie utykając w otoczeniu jednego z maksimum lokalnych. Dzieje się tak, ponieważ do kolejnych etapów optymalizacji przechodzą również osobniki aktualnie gorzej dostosowane, a będące potencjalnymi kandydatami na rozwiązanie optymalne.

### Model sieci transportowej w procesie optymalizacji

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. Ponadto przyjęto założenie, 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 przebiega etapowo i rozpoczyna się od utworzenia populacji początkowej zawierającej dowolne osobniki, następnie ich genotypy podlegają losowym mutacjom i krzyżują się między sobą. Następnie obliczane są wartości funkcji dostosowania dla każdego osobnika. W kolejnym etapie drogą losowania tworzone jest następne pokolenie, a prawdopodobieństwo przejścia osobnika do następnego pokolenia jest zależne od wartości funkcji dostosowania. Po osiągnięciu zadanej liczby pokoleń lub osiągnięciu zadanej wartości funkcji dostosowania proces optymalizacji zostaje zakończony.

#### Genotyp kodujący sieć transportową, operatory mutacji i krzyżowania

**Genotyp** składa się z grafu reprezentującego sieć transportową, zawiera ponadto dla każdego połączenia ciąg liczb rzeczywistych kodujących jego kształt oraz liczbę całkowitą kodującą jego klasę. Ponieważ taki sposób kodowania odbiega od klasycznego kodowania binarnego, właściwsze byłoby określenie opisywanej metody jako algorytmu ewolucyjnego, ale przyjęło się używanie obu pojęć wymiennie (genetyczny, ewolucyjny).

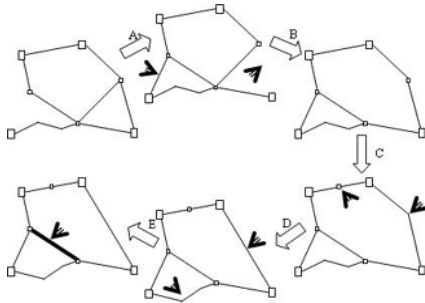
**Mutacje** polegają na losowych zmianach genotypu. W związku z złożoną strukturą genotypu zastosowano kilka różnych operatorów mutacji (rys. 1):

- dodawanie i usuwanie połączeń,
- jedno z istniejących połączeń zostaje związane z innym węzłem,
- dodawanie i usuwanie węzłów sieci, przy czym „miasta” nie mogą zostać usunięte,
- zmiana liczby punktów połączeń i ich współrzędnych odpowiada za zmianę kształtu połączenia,
- zmiana klasy połączenia.

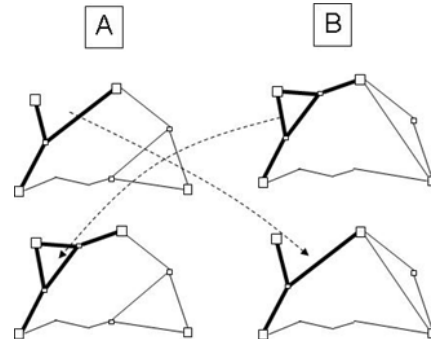
**Operatory krzyżowania** również nie mogą działać całkowicie przypadkowo i wymieniać dowolnych części genotypu, gdyż prowadziłyby do powstania nieprawidłowych genotypów nie kodujących żadnych sieci. Problem ten został rozwiązany przez wprowadzenie procedur wyszukujących w grafie autonomicznych fragmentów 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 (rys. 2).

Tak zdefiniowany operator krzyżowania, zgodnie z hipotezą o „cegiełkach”, umożliwia wydajne generowanie lepiej przystosowanych potomków z osobników o mniejszej wartości funkcji celu, a których struktura zawiera wysokiej jakości fragmenty.

Zastosowane operatory mutacji i krzyżowania są specyficzne dla przyjętej postaci genotypu i w wyniku ich działania powstają zawsze prawidłowe genotypy. Jedyne wyjątki stanowiłyby przypadek, gdy utworzony genotyp określałby graf niespójny. W takim przypadku działanie operatora jest anulowane i przywracany jest stan początkowy.



**Rys. 1.** Przykładowe mutacje  
(Król, Pamuła, 2009)



**Rys. 2.** Krzyżowanie się osobników  
(Król, Pamuła, 2009)

### Wyznaczanie funkcji dostosowania

Za miarę dostosowania osobnika przyjęto odwrotność sumarycznych kosztów budowy i użytkowania sieci.

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

gdzie:  $K_B$  – koszt budowy,  
 $K_U$  – koszt użytkowania.  
 $q$  – wykładnik modyfikujący, domyślnie  $q = 2$

### Koszty budowy sieci

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 odpowiada kosztowi zerowemu, czarny odpowiada kosztowi maksymalnemu. Klasa połączenia jest uwzględniona przez właściwy współczynnik ( $k_b[cl]$ ). Koszt budowy pojedynczego połączenia może być więc wyrażony jako:

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

gdzie:  $D_i$  – długość połączenia,  
 $k_b[cl]$  – koszt jednostkowy w zależności od klasy,  
 $n$  – liczba pikseli wzdłuż połączenia,  
 $p$  – wykładnik modyfikujący rozkład, domyślnie  $p = 1$ ,  
 $g_j$  – wartość  $j$ -tego piksela wzdłuż połączenia.

### Koszty użytkowania sieci

Dużo bardziej złożonym zagadnieniem jest obliczenie kosztów użytkowania sieci przez wszystkie pojazdy na podstawie macierzy intensywności ruchu. Dla pojedynczego pojazdu

na całkowity koszt podróży wpływa głównie ilość zużytego paliwa, ewentualne opłaty drogowe oraz amortyzacja pojazdu i jego utrzymanie. Należy uwzględnić także pieniężny ekwiwalent czasu straconego na podróż.

Koszt użytkowania połączenia przez jeden pojazd zależy również 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 (US Department of Transportation, 1973):

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

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  
 $\alpha, \beta$  – parametry kalibracyjne.

Do obliczeń dla każdej klasy połączenia oszacowano uśrednioną dla różnych typów pojazdów wartość kosztu jednostkowego w ruchu swobodnym.

Wyznaczenie rozkładu strumieni ruchu pomiędzy drogi alternatywne jest w ogólności złożonym podzadaniem optymalizacyjnym (Gen, Altıparmak, Lin, 2006; Kim, Kim, Song, 2008). Przyjęto, że strumienie ruchu są rozdzielane w sieci transportowej przy przyjęciu systemu opisowego – każdy kierujący wybiera drogę tak, aby ponoszone przez niego koszty były jak najmniejsze. Dla przyspieszenia obliczeń, zamiast szukać drogi dla każdego kierującego, zastosowano przybliżoną procedurę, dzieląc całkowite natężenie ruchu tylko na kilkadziesiąt części. W każdym kroku, poczynając od wartości zerowej natężenie jest zwiększane o taki sam ułamek i wtedy szuka się dróg aktualnie najtańszych przy użyciu algorytmu Dijkstry. Znalezione drogi są następnie obciążane bieżącym ułamkiem natężenia ruchu.

### Wyspowy algorytm genetyczny

Zbiór wielu miast w terenie o zróżnicowanej topografii połączonych siecią transportową jest systemem złożonym, zatem może istnieć wiele różnych struktur tej sieci realizujących wymagane potrzeby transportowe przy zbliżonych kosztach. Jest bardzo prawdopodobne, że taka sytuacja jest regułą.

Budowa modelu sieci transportowej wymaga przyjęcia pewnych założeń upraszczających i przybliżeń, a przede wszystkim wykorzystywane dane wejściowe dotyczące intensywności ruchu pochodzą z szacunków lub prognoz, więc obliczone wartości funkcji dostosowania są obarczone pewnym błędem. Jeśli zatem oprócz rozwiązania najlepszego istnieją jeszcze inne, o nieco mniejszej wartości funkcji dostosowania, nie można ich bezwzględnie odrzucać. Może być tak, że niektóre z tych struktur sieci transportowych, mimo gorszej jakości, dla pewnych danych wejściowych są bardziej stabilne – zachowują akceptowalną jakość w szerszym zakresie zmienności danych. Kolejną przyczyną, dla której rozwiązania suboptymalne są warte rozważenia jest fakt, że ostateczna decyzja o wyborze wariantu do realizacji może opierać się też na innych względach, niż te, które udało się objąć zastosowanym modelem.

Tymczasem, klasyczny algorytm genetyczny zmierza zawsze w kierunku tylko jednego z rozwiązań, a inne warianty są z populacji wypierane (Król, 2010). Niedogodność tą można ominąć dzieląc całą populację na kilka podgrup, w których ewolucja przebiega prawie niezależnie. Jedynie od czasu do czasu następuje krzyżowanie się pomiędzy osobnikami z różnych podpopulacji, umożliwiając propagację dobrych rozwiązań cząstkowych. Taka modyfikacja algorytmu genetycznego pozwala na jednoczesne odszukanie wszystkich najważniejszych optimów.

## Wyniki

Przedstawiony model sieci transportowej nie jest jeszcze na tyle zaawansowany, aby zastosować go do realnego obszaru i z realnymi danymi dotyczącymi natężenia ruchu. W szczególności należy dopracować metody pozyskiwania i opracowania danych do wykreślenia mapy kosztów budowy sieci transportowej (w chwili obecnej wszelkie koszty wyrażane są w umownych jednostkach). Przeprowadzono więc wiele symulacji przy fikcyjnych, testowych konfiguracjach mapy kosztów, zmieniając jednocześnie zadane potrzeby transportowe. Parametry pracy algorytmu genetycznego zebrano w tabeli.

**Tabela.** Parametry algorytmu genetycznego

Parametr	Wartość
Prawdopodobieństwo mutacji	0,10
Prawdopodobieństwo krzyżowania	0,70
Prawdopodobieństwo krzyżowania pomiędzy podpopulacjami	0,02
Liczba podpopulacji	8
Liczba osobników w podpopulacji	10
Metoda selekcji	ruletka
Liczba pokoleń	1000-5000

W każdej serii badania prowadzono według tego samego szablonu, umożliwiającego porównanie sieci uzyskanej w wyniku rozbudowy z siecią rzeczywiście optymalną:

- 1) poszukiwanie optymalnej struktury sieci transportowej dla pewnych zadanych potrzeb – uzyskano jedno lub więcej rozwiązań optymalnych;
- 2) zwiększenie potrzeb komunikacyjnych przez dodanie miasta w sieci albo przez zwiększenie natężenia ruchu;
- 3) dla zwiększonych potrzeb ponowne poszukiwanie struktury optymalnej:
  - a) wykorzystując wcześniej otrzymaną sieć transportową jako bazę do rozbudowy i zakładając pewien dopuszczalny zakres modyfikacji,
  - b) rozpoczynając od stanu zerowego, bez żadnych ograniczeń na postać sieci wynikowej.
- 4) porównywanie obu uzyskanych wariantów i ocenianie opłacalności stopnia ingerencji w sieć aktualną.

### Przykład 1

Opisaną procedurę można zilustrować na przykładzie trywialnego przypadku sieci transportowej łączącej dwa miasta, do której następnie włączono trzecie miasto. Dla jasności obrazu przyjęto, że koszty budowy nie są zróżnicowane na rozpatrywanym obszarze.

Sieć pierwotna (rys. 3a) to 2 miasta połączone pojedynczym połączeniem drogowym. Założono średnie natężenie ruchu między miastami. Obliczony koszt budowy to  $11,6 \cdot 10^6$  jednostek, koszt użytkowania sieci  $330 \cdot 10^3$  jednostek. Sieć transportowa dla 3 miast (rys. 3b) powstała przez rozbudowę sieci pierwotnej. Natężenie ruchu pomiędzy każdą parą miast takie samo jak poprzednio. Założono, że nie można zmieniać kształtu pierwotnie istniejącego połączenia.

czenia, a jedynie jego klasę. Obliczony koszt budowy to  $21,0 \cdot 10^6$  jednostek, a koszt użytkowania sieci  $962 \cdot 10^3$  jednostek. Rysunek 3c przedstawia optymalną sieć transportowa dla 3 miast, przy identycznym jak poprzednio natężeniu ruchu. Obliczony koszt budowy to  $19,5 \cdot 10^6$  jednostek, koszt użytkowania sieci  $893 \cdot 10^3$  jednostek.

Porównanie dwóch sieci łączących trzy miasta: 1) optymalnej, 2) powstałej przez rozbudowę, wykazuje niewielką przewagę sieci optymalnej. Biorąc pod uwagę możliwe niedoskonałości modelu, różnice są nieistotne. Zatem w tym prostym przypadku można uznać, że sieć transportowa powstała przez rozbudowę sieci istniejącej jest praktycznie optymalna.

### Przykład 2

W tym i następnym przykładzie, zamiast podawania kosztu budowy i użytkowania sieci w umownych jednostkach, zostanie wprowadzona ogólna ocena jakości sieci uwzględniająca te koszty i unormowana tak, że sieci najwyższej ocenionej przypisano wartość 1,0.

Zestaw danych testowych dotyczy różnych wariantów ewolucji sieci transportowej łączącej pierwotnie 7 miast rozmieszczonych na obszarze o zróżnicowanych kosztach budowy połączeń drogowych. W przeciwieństwie do przykładu 1, istnieje więcej niż jedno rozwiązanie o podobnej jakości dla sieci pierwotnej. Związane jest to ze złożoną strukturą mapy kosztów. Następnie po dodaniu ósmego miasta wygenerowano sieci optymalne dla nowych potrzeb komunikacyjnych oraz sieci bazujące na sieciach pierwotnych. Zestawienie uzyskanych struktur przedstawiono na rysunku 4.

Rysunki 4a, 4b i 4c przedstawiają różne warianty sieci pierwotnej oraz ich unormowane oceny. Rysunki 4d, 4e i 4f przedstawiają odpowiednio warianty sieci transportowej po rozbudowie. Znalaziono tylko dwie wersje sieci optymalnej dla 8 miast o wysokiej ocenie (rys. 4g, 4h).

Powyższe przykłady 1 i 2 wykazują, że różnice pomiędzy siecią optymalną dla nowych potrzeb transportowych a siecią powstałą w wyniku dostosowania istniejącej sieci mogą nie być znaczące. Taki trend zaobserwowano również w wielu innych przebadanych, a nie przedstawionych w artykule przypadkach. Można to spostrzeżenie wyjaśnić interpretując zachodzące w przeszłości i obecnie modyfikacje sieci transportowej jako kolejne etapy zachłannego algorytmu optymalizacyjnego.

### Przykład 3

Powyższe spostrzeżenie dotyczy przypadków, gdy nowopowstałe potrzeby transportowe nie są znacząco większe od dotychczasowych. W przeciwnym wypadku zmodyfikowana struktura sieci transportowej, powstała na bazie sieci istniejącej, może okazać się istotnie gorsza od struktury optymalnej. Taką sytuację ilustruje rysunek 5.

Sieć pierwotna łączy 3 miasta przy średnim natężeniu ruchu (rys. 5a). Dodanie czwartego miasta, położonego w dużym oddaleniu od osi łączącej pozostałe miasta znacząco (około 2 razy) zwiększa natężenie ruchu w sieci. Sieć optymalną dla tego systemu przedstawia rysunek 5b. Rozważono dwa warianty rozbudowy: zachowując jedynie przebieg połączeń, a pozwalając na zmiany ich klas (rys. 5c) oraz zachowując zarówno przebieg, jak i klasy połączeń (rys. 5d). W tym drugim wypadku program wygenerował kilka dodatkowych połączeń tworzących złożoną sieć.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono metodę poszukiwania wytycznych do rozbudowy lub modernizacji sieci transportowej, tak aby zbliżyć ją do struktury optymalnej dla analizowanego obszaru, przy zadanych potrzebach transportowych. Zastosowanie wyspowego algorytmu genetycznego umożliwia jednocześnie znajdowanie kilku najlepszych rozwiązań, które mogą być następnie ponownie rozpatrywane pod kątem innych kryteriów, których nie można było ująć w proponowanym modelu.

Łatwość modelowania struktury sieci transportowej i dość krótki czas obliczeń pozwalają na rozpatrywanie szerokiego spektrum konkurencyjnych propozycji rozbudowy sieci. Aktualna postać sieci transportowej i zakres dopuszczalnych ingerencji w jej strukturę są danymi wejściowymi, zatem możliwe jest przeanalizowanie wielu opcji rozbudowy: od drobnych, koniecznych korekt, aż do gruntownej przebudowy w celu zbliżenia się do prawdziwie optymalnej struktury. W każdym rozpatrywanym wariantcie uzyskiwane są informacje o korzyściach (zmniejszeniu kosztów użytkowania) i kosztach (nakładach na rozbudowę).

## Literatura

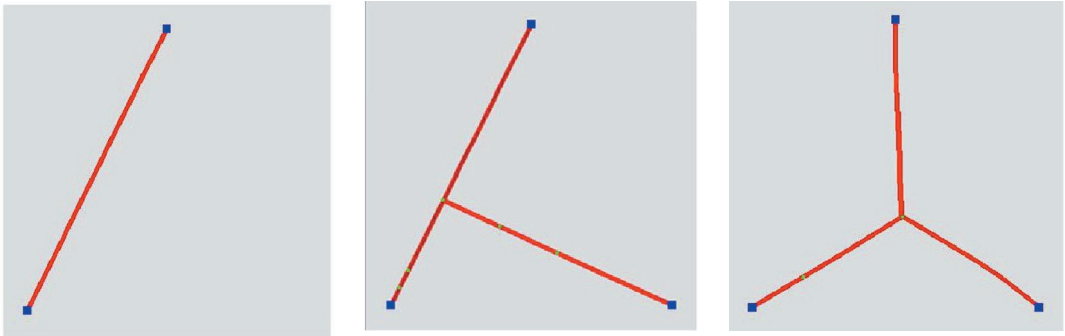
- Arabas J., 2004: Wykłady z algorytmów ewolucyjnych, WNT, Warszawa.
- Drezner Z., Wesolowsky G.O., 2003: Network design: selection and design of links and facility location, *Transportation Research Part A* 37, 241-256.
- Feng Ch., Lin J., 1999: Using a genetic algorithm to generate alternative sketch maps for urban planning, *Computers Environment and Urban Systems* 23, 91-108.
- Gen M., Altıparmak F., Lin L., 2006: A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding, *OR Spectrum* 28:337-354.
- Kim B. J., Kim W., Song B. H., 2008: Sequencing and scheduling highway network expansion using a discrete network design model, *Ann Reg Sci* 42: 621-642.
- Król A., Pamuła T., 2009: 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, 179-187.
- Król A., 2010: Poszukiwanie alternatywnych struktur sieci transportowych za pomocą algorytmu genetycznego, *Logistyka* 6/2010.
- Pinninghoff M., Contreras R., Atkinson J., 2008: Using Genetic Algorithms to Model Road Network, IEEE Computer Society.
- Ratajczak M., 1999: Modelowanie sieci transportowych, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- US Department of Transportation, 1973: Traffic Assignment, Washington.

## Abstract

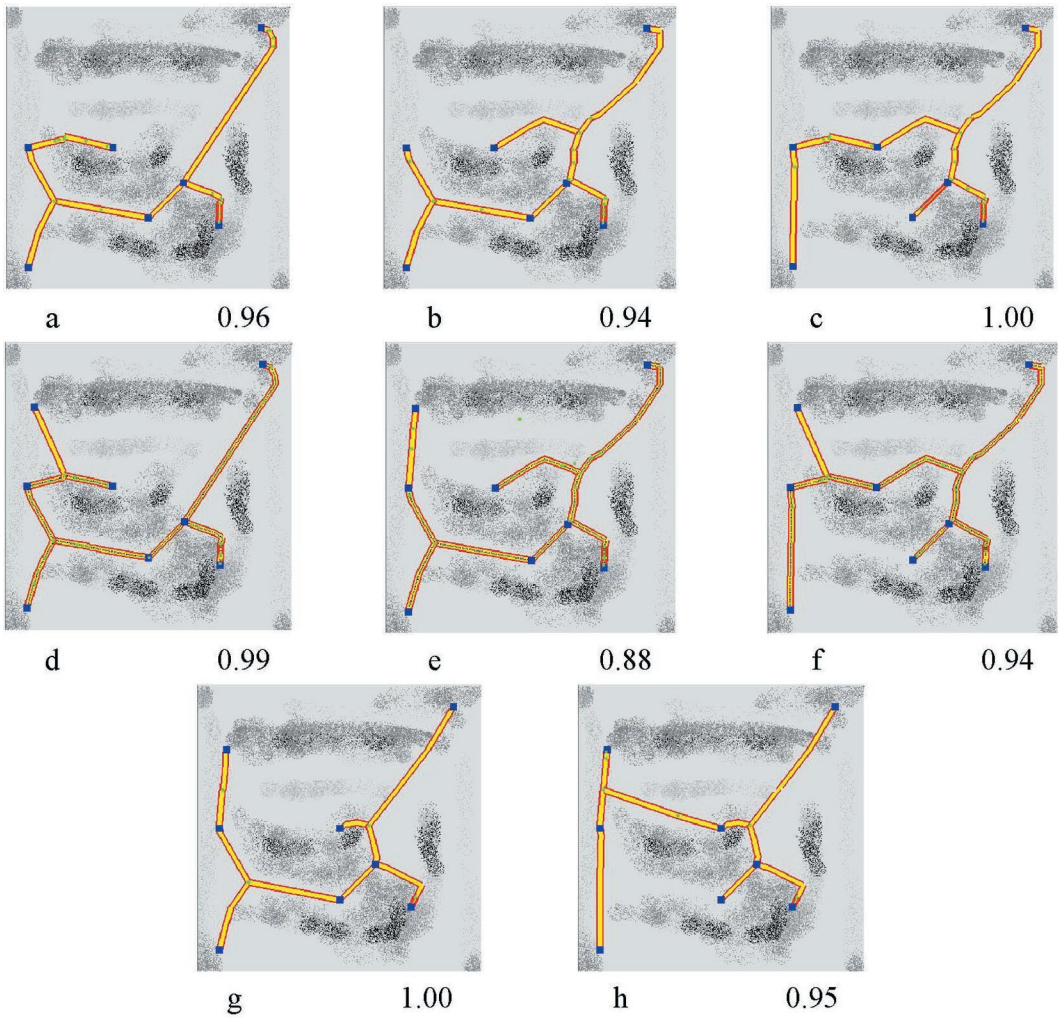
*The current transportation network structure is usually the result of historical and often long random adaptation processes and it is almost surely not optimal for the present needs. As always in the past, when modernization or extension was required, the current state was the base for changes. Cases, where the design of whole transportation network is possible, are very rare. Possible existence of several transportation network variants meeting new needs constitutes an additional difficulty. In this situation, development of a method allowing comparison of different variants of transportation network extension is an interesting and urgent task. In the absence of analytical description and due to the complexity of the problem, exploration of the whole range of solutions is impossible and it seems the most appropriate to use artificial intelligence methods, particularly evolutionary algorithms.*

dr Aleksander Król  
aleksander.krol@polsl.pl  
tel. +48 32 603 41 20

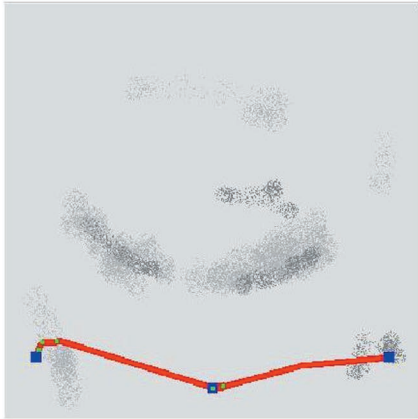




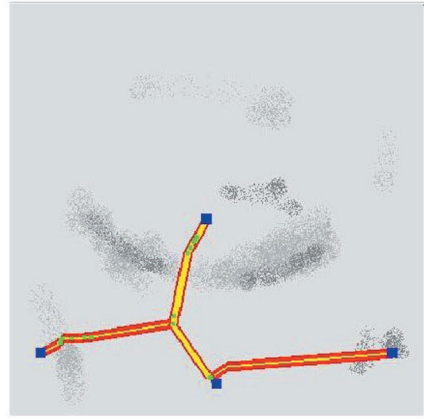
Rys. 3. Rozbudowa prostej sieci transportowej



Rys. 4. Rozbudowa złożonej sieci transportowej w obszarze o zróżnicowanych kosztach budowy

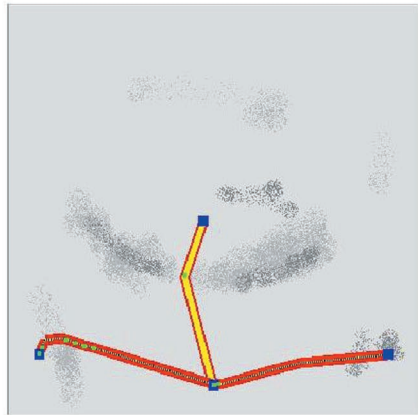


a



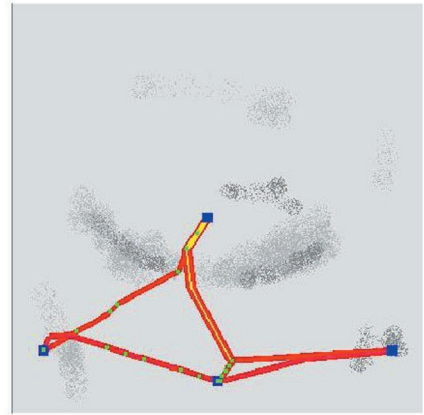
b

1.00



c

0.85



d

0.77

Rys. 5. Rozbudowa sieci transportowej w wyniku znacznego wzrostu potrzeb transportowych