

Optymalizacja kształtu monocentrycznej sieci transportowej z zastosowaniem optymalizacji wielokryterialnej

Rafał Kucharski

W artykule pokazano próbę rozwiązania problemu optymalnego kształtu sieci połączeń regionalnych. Problem rozwiązywano na przykładzie sieci połączeń wojewódzkich w województwie lubelskim. Danymi wejściowymi do rozwiązywanego problemu były dane o sieci transportowej oraz rozmieszczeniu ludności. Złożony problem optymalizacyjny próbowano uprościć przyjętą heurystyką opartą o metody zaczerpnięte z teorii grafów. Za pomocą nieanalitycznych metod optymalizacyjnych rozwiązano wielokryterialny problem określenia kształtu sieci. Wybrano kilkanaście potencjalnych kandydatów, których oceniono na podstawie kolejnych kryteriów dodatkowych i wybrano optymalne rozwiązania.

Artykuł jest zmodyfikowaną wersją referatu wygłoszonego na VIII. konferencji z cyklu „Problemy komunikacyjne miast w warunkach zatłoczenia motoryzacyjnego” która odbyła się w Poznaniu i w Rosnówku 15-17 czerwca 2011 roku.



Rafał Kucharski
student studiów
doktoranckich, mgr inż.,
Politechnika Krakowska

Problem znalezienia optymalnego kształtu sieci transportowej jest złożonym zagadnieniem optymalizacyjnym. Jego rozwiązywalność jest ograniczona możliwościami obliczeniowymi programów optymalizacyjnych. W miarę wzrostu wielkości optymalizowanej sieci wykładniczo rośnie nakład obliczeń. Wobec tego kluczową sprawą przy rozwiązywaniu tego typu problemów jest stosowanie uproszczeń zmniejszających nakład obliczeń.

Podstawowym uproszczeniem jest agregacja analizowanej przestrzeni (sieci transportowej) do rejonów komunikacyjnych. Proces ten jest często bagatelizowany, co może prowadzić do zniekształceń i rzutować na jakość wyniku. Proces agregacji poprzedzający analizę zawartą w niniejszym referacie opisano w osobnym artykule [6], skrótowo przytacza się go poniżej.

Dla czytelności i dla zmniejszenia nakładu obliczeń analizowaną sieć przedstawiono jako graf o wierzchołkach w miastach powiatowych (powiaty grodzkie łączono z ziemskimi) i o łukach będących bezpośrednimi połączeniami między powiatami. Pozwoliło to na zastosowanie aparatu teorii grafów.

Krokiem mającym uprościć proces optymalizacyjny jest ustalenie pewnych założeń co do kształtu sieci. W referacie optymalizo-

wano sieć połączeń wojewódzkich, co do których założono, że będzie ona monocentryczna z centrum w stolicy województwa (w Lublinie). To założenie pozwoliło zastosować pewne heurystyki upraszczające.

Pierwszą próbą było analizowanie minimalnych drzew rozpinających (Minimal Spanning Tree), tzn. takich podgrafów, które łączą ze sobą wszystkie wierzchołki za pomocą najmniejszej długości łuków. Zmodyfikowany podstawowy algorytm szukania minimalnego drzewa rozpinającego szukający również kolejnych najmniejszych drzew w rosnącej kolejności, okazał się być nieodpowiedni. Podstawowym problemem okazał się brak możliwości określenia głównego „korzenia drzewa”. Centrum sieci monocentrycznej powinien być Lublin, podczas gdy algorytm na podstawie niezależnej od użytkownika, procedury wybierał korzeń drzewa. Przeszkoda ta z racji struktury algorytmu okazała się zbyt trudna do przeskoczenia przez autora.

Kolejnym przybliżeniem było zastosowanie podstawowego algorytmu szukania najkrótszej ścieżki w grafie. Z macierzy najkrótszych ścieżek pomiędzy miastami powiatowymi analizowano długości ścieżek do Lublina. Suma iloczynów długości dojazdów do Lublina i liczby mieszkańców powiatu była pierwszym kryterium procedury optymalizacyjnej. Sama jednak minimalizacja tego kryterium wymagała dodatkowych ograniczeń, by optymalizacja miała sens. Zamiast statycznych ograniczeń wybrano wielokryterialną optymalizację, w której drugim kryterium była długość sieci. Z jednej strony więc minimalizowano długość dojazdów do Lublina, a z drugiej minimalizowano długość obsługiwanej sieci.

Zauważono jednak, że sama minimalizacja długości dojazdów do Centrum sieci

nie jest wystarczającym kryterium. Zakładała ona, że istotne są jedynie połączenia z Lublinem, podczas gdy pewne połączenia pomiędzy miastami powiatowymi powinny również zostać uwzględnione. Wobec tego wprowadzono dodatkowe kryterium procedury optymalizacyjnej, kryterium maksymalnej dostępności. Metoda ostatecznie posiadała trzy kryteria: dwa po stronie pasażera i jedno po stronie operatora.

W wyniku przeprowadzenia procedury otrzymywano zbiór potencjalnych rozwiązań optymalnych, z których wybierano odpowiednie. Wybór rozwiązań z otrzymanego zbioru był oparty o dodatkowe kryteria: kryterium jak najmniejszego różnicowania w dostępie do Centrum sieci, oraz kryterium maksymalnego wykorzystania sieci kolejowej.

Formalny zapis tej idei przedstawiono w kolejnych rozdziałach.

Dane wejściowe

Podstawowymi danymi wejściowymi była zakodowana numerycznie sieć transportowa (linie kolejowe, drogi od krajowych do gminnych), oraz zakodowana numerycznie informacja o rozmieszczeniu ludności (położenie każdej jednostki administracyjnej, plus liczba mieszkańców). Na podstawie takiej bazy danych zagregowano dane do powiatów (liczbę ludności) i stworzono rejon komunikacyjny.

Tworzenie rejonów komunikacyjnych poprzedzono analizą przestrzenną w której określono środki ciężkości powiatów, transportochłonność podróży do siedziby powiatu, średnią długość dojazdu do siedziby na mieszkańca, optymalne punkty dostępu do metropolii (centrum sieci monocentrycznej). Analizę tą autor referatu opisuje

w osobnym artykule [6]. Wyniki tej analizy (rozieszczenie punktów charakterystycznych powiatów) pokazuje rys. 1.

Dodatkowo jako dane wejściowe posłużyły informacje o wielkościach charakterystycznych dla powiatów (liczba miejsc pracy, etc.) Dane te były używane w określaniu dodatkowych kryteriów w analizie wielokryterialnej.

Podstawy teoretyczne

Przedstawione rozwiązanie dość skomplikowanego problemu optymalizacyjnego wymaga wprowadzenia teoretycznego, które nie może być tu przedstawione z racji oczekiwanej objętości artykułu. Podstawy teoretyczne dotyczące teorii grafów, teorii optymalizacji, optymalizacji wielokryterialnej, algorytmów genetycznych, a także praktyczne wskazówki dotyczące definicji problemu, doboru kryteriów, oraz reguł algorytmu dostępne są w licznych publikacjach, z których część wymieniona jest w spisie literatury. Skrótowy opis teoretyczny problemu przedstawiono poniżej:

Referat przedstawia rozwiązanie wielokryterialnego nieanalitycznego problemu optymalizacyjnego. Skończona liczba rozwiązań (grafów) czyni z niego problem dyskretny. Do rozwiązania problemu użyto wielokryterialnego algorytmu genetycznego dostarczonego wraz z programem Matlab®. Dostrajanie algorytmu odbywało się na podstawie obserwowanych zależności, oraz wiedzy o algorytmach genetycznych [3 i in.]. Przegląd literatury dostarcza większej wiedzy na temat dobierania parametrów, a przytoczone poniżej uwagi nie powinny być wykładnią do parametryzacji algorytmów genetycznych. W przedstawionej metodzie dobrano następujące parametry:

- binarna zmienna decyzyjna,
- populacja początkowa: pełny graf (wektor jedynekowy, wszystkie odcinki),
- wielkość populacji: 200 osobników,
- selekcja za pomocą domyślnej metody ruletki (tournament),
- domyślny udział populacji w operacji krzyżowania: 0.8,
- krzyżowanie metodą rozproszoną (scattered),
- dla szerszego przeszukiwania i unikania optimów lokalnych zwiększono współczynnik mutacji (z 0.01 do 0.1),
- warunkiem zakończenia algorytmu było osiągnięcie pożądanej stabilności kolejnych punktów (małe zmiany w osiągniętych wartościach kryteriów).

Dobór kryteriów przeprowadzony był tak, by spełniał następujące warunki spójności (spójnej rodziny kryteriów) [2]:

- zupełność: kryteria powinny opisywać problem w sposób pełny, tzn. z tego, że rozwiązanie jest optymalne dla całego

problemu wynika, że jest rozwiązaniem optymalnym dla dobranych kryteriów,

- niezależność: żadna para kryteriów nie powinna być współzależna, tzn. nie jest prawdą, że zmiana jednego kryterium z konieczności pociąga za sobą określoną zmianę drugiego kryterium. Pomiędzy kryteriami zachodzą następujące zależności:
 - dwa kryteria po stronie pasażera są przeciwstawne kryteriom po stronie operatora, czyli polepszenie jednego zazwyczaj (nie zawsze, bo to problem nieanalityczny) pociąga za sobą pogorszenie drugiego,
 - dwa kryteria po stronie pasażera są ze sobą zgodne, ale nie są zależne. Front Pareto dla tych dwu kryteriów nie jest linowy, jest nieregularny.

Ogólna postać problemu

Problem optymalizacji sieci transportowej w swej najogólniejszej definicji to problem minimalizacji pracy przewozowej po stronie pasażera przy jednoczesnej minimalizacji pracy przewozowej po stronie operatora. Te dwa przeciwstawne kryteria w analizie wielokryterialnej powinny spotkać się w rozsądnym punkcie kompromisowym, którego położenie zależy jest albo od wagi poszczególnych kryteriów, albo od analizy frontu Pareto. Front Pareto jest takim zbiorem punktów w przestrzeni możliwych rozwiązań, dla których zmiana wartości którejkolwiek ze zmiennych decyzyjnych prowadzi do pogorszenia wartości co najmniej jednego z kryteriów, jest to więc zbiór kompromisów pomiędzy kryteriami.

Zmiennymi decyzyjnymi algorytmu są albo linie transportowe, albo odcinki będące elementami sieci. W dużym stopniu ogólności można uprościć analizę i zamiast przeprowadzania analizy linii transportowych (czyli łączonego problemu kształtu sieci i problemu marszrutyzacji linii) przeprowadzić analizę samego kształtu sieci. Wówczas zamiast decydować o konkretnym przebiegu linii (marszrutyzacji) decydujemy o odcinkach po których przebiegały będą linie transportowe. Zdaniem autora przy analizie połączeń wewnątrz województwa analiza samego kształtu sieci jest uzasadniona.

Formalnie problem można przedstawić następująco:

$$PO_{\min} C(x) \quad || \quad C(x) = [C_o(x), C_p(x)], x \in X \quad (1)$$

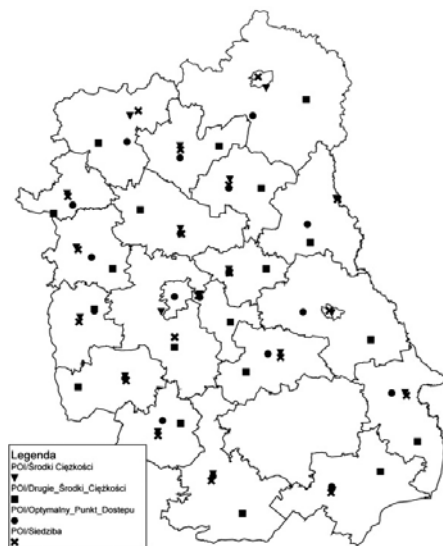
gdzie: X – zbiór łuków grafu

x – podzbiór łuków grafu

$C(x)$ – koszty funkcjonowania systemu

$C_o(x)$ – część kosztów związana z operatorem

$C_p(x)$ – część kosztów po stronie pasażera



1. Wyniki analizy przestrzennej rejonów komunikacyjnych - położenie centroid



2. Sieć transportowa zakodowana w programie Visum



3. Reprezentacja możliwych połączeń za pomocą grafu

Dobór kryterium odzwierciedlającego koszty po stronie pasażera jest zależny od przyjętych założeń co do sieci. W tej analizie założono, że istotne są dojazdy do Centrum (do metropolii Lubelskiej), ale również istotna jest możliwość podróży pomiędzy powiatami, wyrażona dostępnością (wzór 2). Stworzono dwa kryteria po stronie pasażera, oparte o dwa różne założenia.

Uzasadnienie wyboru kryteriów

Pierwsze kryterium uznaje, że istotne są połączenia między powiatami, a stolicą województwa (metropolią). Jest to założenie dyskusyjne, ale w opinii autora uzasadnione. W świetle proponowanej polityki rozwoju polski wschodniej istotą rozwoju regionów słabiej rozwiniętych jest ich połączenie z bardziej rozwiniętymi regionami. W perspektywie Lublina istotne jest więc połączenie z Warszawą, a w skali powiatów Lubelszczyzny połączenie w Lublinem (a przez Lublin z Warszawą i dalej). Założono więc, że kryterium optymalizacyjnym po stronie użytkownika powinna być suma iloczynów liczby mieszkańców powiatu i odległości do Lublina.

Z drugiej strony można założyć, że istotna jest dostępność wewnętrzna województwa, wyrażona za pomocą następującej definicji zgodnej z klasyczną definicją C.D. Harris, w [4]:

Def. Dostępność punktu zdefiniowana matematycznie to suma iloczynów funkcji kosztu dojazdu i atrakcyjności celu podróży po wszystkich celach podróży:

$$D_i = \sum_j A_j f(C_{ij}) \quad (2)$$

Otrzymano więc dwa różne kryteria optymalizacyjne odzwierciedlające koszty po stronie pasażera:

$$C_p(x) = [C_{p1}(x); C_{p2}(x)] = [\sum_i l_{ic} m_i; \sum_i \sum_j l_{ij}^{-1} m_i] \quad (3)$$

Gdzie:

x	analizowana sieć transportowa
$C_{p1}(x)$	koszt związany z dojazdem do Centrum sieci
$C_{p2}(x)$	koszt związany z dostępnością
l_{ic}	odległość z powiatu i do Centrum sieci
l_{ij}	odległość z powiatu i do powiatu j
m_i	liczba mieszkańców powiatu i

Uproszczenie sieci za pomocą grafu

Zdecydowano się na uproszczenie sieci za pomocą grafu. Po początkowym zafascynowaniu metodą znajdowania kolejnych minimalnych drzew rozpinających odkryto wady tego algorytmu, które uniemożliwiły jego adaptację do rozwiązania problemu

Spróbowano więc z pewnym powodzeniem zastosować algorytmy genetyczne, w których zmienne decyzyjne były zmiennymi logicznymi odpowiadającymi za przyna-

leżność łuku grafu do konkretnego rozwiązania. Dla sieci posiadającej 82 łuki możliwe było stworzenie 282 różnych sieci.

Obliczanie wartości kryteriów

W rozwiązywanym problemie optymalizacji wielokryterialnej wybrano trzy kryteria. Możliwości operacyjne algorytmu i zastosowanych narzędzi pozwalają na zwiększenie liczby kryteriów i zwiększenie nakładu obliczeń dla całej procedury. W niniejszej analizie skupiono się na bardzo podstawowych kryteriach, wolnych od założeń arbitralnych. Analiza wielokryterialna oparta o metodę stożków Pareto pozwala na dobór samych kryteriów bez analizowania ich rang, których arbitralność często jest powodem dyskusyjności wyników.

Wybrano trzy kryteria. Pierwsze odzwierciedla koszty jakie ponosić będzie operator i wyrażone w długości linii sieci transportowej w kilometrach. Jest to dość intuicyjne i czytelne kryterium, o którym można z dużą pewnością założyć, że jego minimalizacja pośrednio prowadzi do minimalizacji kosztów operacyjnych.

Pozostałe dwa kryteria odzwierciedlają koszty jakie ponosi pasażer i wyrażone są w pracy przewozowej (pasażerokilometrach). Przyjęto tutaj dwa kryteria:

- minimalizację długości podróży po sieci do metropolii ważoną liczbą mieszkańców oraz
- maksymalizację dostępności wyrażonej sformułowaną wyżej definicją.

Przyjęcie dwu kryteriów po stronie pasażera skutkuje tym, że pasażer ma niejako dwa głosy. Pierwszy głos oddaje na jakość połączeń do Lublina, a drugi na maksymalizację dostępności swojego ośrodka (siedziby powiatu) względem innych. Operator ma z kolei tylko jeden głos, który oddaje, by minimalizować swoje koszty operacyjne.

Przedstawiona metoda pozwala na przyjęcie innych, bardziej skomplikowanych kryteriów. Możliwe jest przykładowo dla każdego rozwiązania wysłanie zapytania poprzez obiekt COM do programu Visum. Może to być np. zapytanie o wyniki rozkładu ruchu na sieć w modelu czterostadiowym i związana z nim charakterystyka (np. modal split), należy jednak pamiętać, że procedura optymalizacyjna analizowała ponad 100 000 osobników, a kryterium musi być obliczane dla każdego z nich. Niemożliwe będzie więc przeprowadzenie chociażby czasochłonnej procedury PuT Timetable Based Assignment.

Algorytm podstawowy

Ostatecznie przyjęto następujący algorytm:

1. Określ graf (łuki i wierzchołki)
2. Stwórz populację początkową (osobnik z populacji to dowolny podzbiór zbioru wierzchołków)

3. Oceń każdego osobnika populacji pod kątem trzech kryteriów:
 - a. Długość włączonych do sieci odcinków – długość sieci, czyli koszt operatora
 - b. Wielkość pracy przewozowej, czyli iloczyn wektora długości dojazdów z powiatu do metropolii mnożony przez liczbę ludności powiatu – koszt po stronie pasażera.
 - c. Dostępność wyrażona za pomocą wzoru (2).
4. Stwórz nową populację na podstawie zasad algorytmu genetycznego.
5. Jeśli nie zostały spełnione kryteria zakończenia algorytmu wróć do punktu trzeciego, a jeśli zostały, to
6. Zapisz zbiór rozwiązań z frontu Pareto i przejdź do procedury wyboru konkretnego rozwiązania.

Techniczny opis metody

Model stworzono na podstawie bazy danych GIS zawierających dane o sieci transportowej (drogowej i kolejowej) oraz o rozmieszczeniu ludności. Model stworzono w programie Visum. Na podstawie bazy danych stworzono odpowiednią dla programu Visum sieć transportową oraz rejony komunikacyjne (powiaty) opisane na podstawie wyników analizy przestrzennej.

Model z programu Visum otwarto zdalnie poprzez obiekt COM z poziomu konsoli programu Matlab i pobrano odpowiednią bazę danych. W programie Matlab przetłumaczono sieć programu Visum na graf odpowiadający sieci transportowej. Użyto do tego zbioru narzędzi związanych z teorią grafów autorstwa Sergii Inglina z Politechniki w Charkowie. W programie Matlab stworzono odpowiednie funkcje obliczające wielkości kryteriów optymalizacyjnych.

Użyto narzędzia do optymalizacji globalnej (Global Optimization Toolbox) programu Matlab, posiadającego moduły do wielokryterialnej optymalizacji za pomocą algorytmów genetycznych.

Otrzymane wyniki poddano opisanej niżej w świetle założonych kryteriów. Rozwiązania przekazano za pomocą obiektu COM do programu Visum, gdzie przetłumaczono je do postaci sieci transportowej, którą można dokładniej analizować i modelować.

Wybór rozwiązania optymalnego na froncie Pareto

Wielokryterialny algorytm genetyczny nie dostarcza konkretnego rozwiązania, a zbiór (front) rozwiązań, które spełniają warunki Pareto. W proponowanej metodzie znaleziono zbiór n potencjalnych rozwiązań, które są równoważne z punktu widzenia założonych kryteriów. Aby wybrać optymalne rozwią-

zanie należy albo nadać wagi kryteriom, co uznano za niezręczne, albo użyć kryteriów pomocniczych. Dodatkowe kryteria powinny być dobrane tak, by odzwierciedlały cechy sieci, które nie są opisywane przez kryteria podstawowe (w procesie optymalizacyjnym). Dobrym kryterium mogłoby być np. dopasowanie empirycznej więźby ruchu do sieci transportowej, konkurencyjność transportu zbiorowego do indywidualnego, etc. Pominięto jednak wszystkie wskaźniki oparte o więźbę ruchu z racji jej braku. Jej budowa wymagałaby dodatkowych analiz i dużej ilości pracy. Autorowi zależało jednak na tym, by analizy nie opierały się o arbitralnie przyjmowane założenia.

W opisywanej analizie wybrano dwa kryteria dodatkowe:

1. K_1 kryterium odzwierciedlające różnicę w dostępności do Centrum sieci. Kryterium wyrażone poprzez odchylenie standardowe wektora $C_{p_i}(x)$. Im mniejsza wartość kryterium tym bardziej „sprawiedliwa” jest sieć transportowa.
2. K_2 kryterium wykorzystania sieci kolejowej. Założono, że należy promować sieci wykorzystujące linie kolejowe. Kryterium pokazuje procentowy udział połączeń kolejowych w całej proponowanej sieci. Im większa wartość kryterium, tym większy udział kolei w długości sieci.

Dla każdego z rozwiązań procedury optymalizacyjnej (punktów położonych na empirycznym froncie Pareto) obliczono wartości kryteriów dodatkowych. Stworzono zbiorczą tabelę dla wszystkich potencjalnych rozwiązań i określono w wartości pięciu kryteriów (trzech kryteriów procedury optymalizacyjnej, oraz dwu kryteriów dodatkowych). Stworzono dodatkową tabelę rang na podstawie której określono miejsca rankingowe poszczególnych punktów z frontu Pareto. Początkowo założono, że każde z kryteriów jest równoważne, doprowadziło to jednak do zbyt dużej promocji rozwiązań z dużą długością sieci (np. rozwiązanie wybierające 77 z 82 możliwych łuków grafu). Zwiększono więc wagę kryterium długości sieci tak, by promować „oszczędne” sieci kształtem zbliżone do „drzew monocentrycznych z kilkoma gałęziami łączącymi sąsiednie pnie”.

Wyniki

Przeprowadzono procedurę opisaną powyżej. Warunki zbieżności procedury otrzymano po przeanalizowaniu 1446 generacji algorytmu genetycznego, co oznaczało przeanalizowanie 118665 kandydatów, spośród 282 możliwych. Otrzymano front Pareto składający się z 15 różnych osobników opisanych w poniższej tabeli. Dla każdego z nich obliczono wartości dwu dodatkowych kryteriów i zebrano w poniższej tabeli:

Transportochłonność rozwiązań waha

się od 120 mln do 160 mln pasażerokilometrów. Długość sieci waha się od 1200 km do prawie 3000 km i są to różnice znaczne. Dostępność waha się od 600 000 do 920 000 mieszk./km. Odchylenie standardowe dostępności do Lublina z powiatów wynosi od 60 do 100, udział linii kolejowych w długości sieci wynosi od 36% do 58%.

Przedstawione sieci różnią się zarówno długością (sieci niepełne – nr 8 i nr 22), sieć prawie pełna (nr 17). Poniżej dla celów porównawczych przedstawiono wynik analizy dwukryterialnej: analizowano kompromis między dojazdami do Centrum, a długością sieci, otrzymując najkrótsze ścieżki dojazdu do Centrum (do Lublina).

Na rysunku 9 przedstawiono front Pareto dla ostatecznej generacji rozwiązania. Front pokazuje kompromis pomiędzy długością sieci, a dostępnością.

Podsumowanie

Przeprowadzone analizy pokazują formalne podejście do określania kształtu sieci transportowej. Stosunkowo zaawansowany aparat używany do rozwiązania wielokryterialnego problemu optymalizacyjnego jest technicznym rozwiązaniem problemu, który chyba jednak nie powinien być analizowany tylko od strony formalnej. Przedstawione rozwiązanie z punktu widzenia przyjętych kryteriów są optymalne, ale z punktu widzenia eksperta znającego system i potrzeby pasażerów mogą wydawać się zupełnie nietrafne. Dlatego istotna jest współpraca z jednej strony techników dostarczających formalnej aparatury narzędziowej do rozwiązywania złożonych problemów optymalizacyjnych, a z drugiej ekspertów znających optymalizowany system od strony funkcjonalnej. Taka dialektyczna współpraca dwu różnych odmiennych spojrzeń może okazać się owocna i prowadzić do polepszenia jakości rozwiązań.

Istotną częścią tego referatu jest pokazanie, że przy dzisiejszym dostępie do ogromnej mocy obliczeniowej, zaawansowanych narzędzi obliczeniowych z przyjaznym interfejsem rozwiązywanie złożonych problemów za pomocą zaawansowanych metod matematycznych jest stosunkowo proste. Wymaga podstawowej wiedzy z teorii optymalizacji, programowania oraz modelowania ruchu. Najprawdopodobniej minęły czasy, gdy do rozwiązania problemu optymalizacyjnego potrzebne były stopy obliczeń hessianów, gradientów i tworzenia modeli o ściśle określonej strukturze. Kod użyty do rozwiązania niniejszego problemu miał nie więcej niż kilkadziesiąt linii, a wielokryterialny algorytm genetyczny obsługiwany jest za pomocą intuicyjnego interfejsu.

Równie istotną nauką z tego referatu jest to, że dane wejściowe, będące warunkiem



4. Sieć nr 8



5. Sieć nr 17



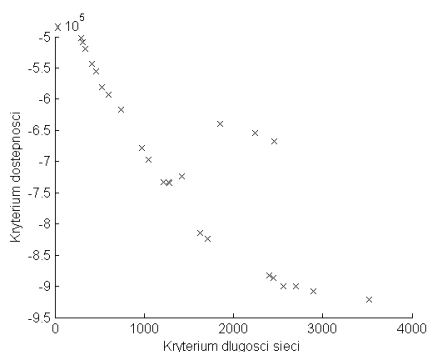
6. Sieć nr 22



7. Sieć nr 28



8. Wynik optymalizacji dwukryterialnej (długość sieci i dostęp do Centrum sieci)



9. Front Pareto dla dwu z trzech kryteriów

powodzenia przedsięwzięcia, są dostępne i należy z nich korzystać gdy to tylko możliwe. Mapy sieci transportowej zapisane w formie numerycznej są powszechnie i nieodpłatnie dostępne w sieci, tak samo dane o rozmieszczeniu ludności. Gdy inżynier modelujący sieć ma dostęp do takich danych i tworzy sieć w kilka godzin, może poświęcić się bardziej złożonym analizom. ◀

Materiały źródłowe:

[1] Bielli M., Caramia M., Carotenuto P.: „Genetic algorithms in bus network optimization.” *Transportation Research Part C*, 10 2002 s.19-34.
 [2] Dumont A., Tille M., „Methods of multi-criteria decision analysis within the road projects like an element of the sustainability” 3rd Swiss Transport Research Conference, Monte Verità / Ascona, March 19-21, 2003
 [3] Goldberg D., „Algorytmy genetyczne i ich zastosowania”, WNT 1998; s. 212–217
 [4] Hansen, W.: „How accessibility shapes land use.” *Journal of the American Institute of Planners*, 1959, wyd. 25: 73-76.
 [5] Komornicki T. z zespołem.: *Opracowanie metodologii liczenia wskaźnika międzygałęziowej dostępności transportowej terytorium polski oraz jego szacowanie.* Warszawa: PAN Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego, 2008.

Tab.1. Wartości kryteriów dla rozwiązań z frontu Pareto

p. Kolejny numer sieci z ostatniej generacji	C_{p1}	C_o	C_{p2}	K_1	K_2
	Transportochłonność dojazdów do Lublina [1000 paskm]	Długość Sieci [km]	Dostępność [miesz./km]	odchylenie standardowe długości dojazdów do Lublina	udział połączeń kolejowych [%]
8	161 000	1 218	732 902	99,3	44%
22	161 000	1 282	733 704	99,3	51%
10	161 000	1 276	733 447	99,3	46%
28	128 000	1 423	723 114	66,2	58%
2	122 000	1 851	640 084	62,8	45%
20	123 000	2 241	653 834	63,7	41%
15	122 000	2 457	667 836	62,8	39%
1	133 000	1 624	814 889	71,1	39%
23	132 000	1 707	823 710	67,5	37%
19	126 000	2 400	882 689	68,2	39%
27	121 000	2 700	900 210	59,6	37%
17	121 000	3 521	921 467	59,6	37%
21	136 000	2 445	886 533	72,6	40%
18	122 000	2 556	900 101	62,8	41%
7	122 000	2 898	908 254	62,8	36%

Tab.2. Rangi poszczególnych rozwiązań

Ranking rozwiązań z frontu Pareto							
lp.	transportochłonność dojazdów do Lublina [1000 paskm]	długość sieci [km]	dostępność [miesz./km]	odchylenie standardowe długości dojazdów do Lublina	udział połączeń kolejowych [%]	suma rang	miejsce rankingowe
8	13	1	11	13	5	48	5
22	13	3	9	13	2	46	3
10	13	2	10	13	3	45	2
28	9	4	12	8	1	42	1
2	3	7	15	3	4	46	3
20	7	8	14	7	6	58	9
15	3	11	13	3	9	61	11
1	11	5	8	11	10	55	7
23	10	6	7	9	14	58	9
19	8	9	6	10	11	62	13
27	1	13	3	1	13	57	8
17	1	15	1	2	12	61	11
21	12	10	5	12	8	67	15
18	3	12	4	3	7	53	6
7	3	14	2	3	15	65	14

[6] Kucharski R., „Parametryzacja rejonów komunikacyjnych w regionalnych modelach ruchu”, *Transport Miejski i Regionalny* 7-8 2011,
 [7] Kusiak J., Danielewska-Tulecka A., Oprocha P., „Optymalizacja”, PWN 2009
 [8] Sörensen, Kenneth.: „An algorithm to generate all spanning trees of a graph in order of increasing cost.” *Pesquisa Operacional*, s. 219-229, 5-6 2005,
 [9] Yi-Kuei L., „An Algorithm to Generate All Spanning Trees with Flow.” *Mathematical and Computer Modelling*, s. 1453-1458, 2002.
 [10] Zeng, X., i Zhao, F., „Optimization of transit network layout and headway with a combined genetic algorithm and simulated annealing method.” *Engineering Optimization*, s701-722, 9/2006.