XV Krajowa Konferencja Automatyki

Tom II

KKA
2005

Redaktorzy:
Zdzisław Bubnicki
Roman Kulikowski
Janusz Kacprzyk

XV Krajowa Konferencja Automatyki
Tom II

Redaktorzy:
Zdzisław BUBNICKI
Roman KULIKOWSKI
Janusz KACPRZYK

ORGANIZATOR
Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓŁORGANIZATORZY
Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

ORGANIZATOR

Komitet Automatyki i Robotyki Polskiej Akademii Nauk
Instytut Badań Systemowych Polskiej Akademii Nauk

WSPÓŁORGANIZATORZY

Politechnika Warszawska
Przemysłowy Instytut Automatyki i Pomiarów
Polskie Stowarzyszenie Pomiarów, Automatyki i Robotyki

KOMITET PROGRAMOWY

Przewodniczący	Zdzisław BUBNICKI
Zastępca Przewodniczącego	Roman KULIKOWSKI

CZŁONKOWIE

Stanisław BAŃKA	Michał BIAŁKO
Mikołaj BUSŁOWICZ	Władysław FINDEISEN
Ryszard GESSING	Henryk GÓRECKI
Jakub GUTENBAUM	Jerzy JÓZEFCZYK
Stanisław KACZANOWSKI	Tadeusz KACZOREK
Janusz KACPRZYK	Jerzy KLAMKA
Józef KORBICZ	Zbigniew KOWALSKI
Krzysztof KOZŁOWSKI	Juliusz L. KULIKOWSKI
Krzysztof KUŹMIŃSKI	Kazimierz MALANOWSKI
Krzysztof MALINOWSKI	Wojciech MITKOWSKI
Antoni NIEDERLIŃSKI	Władysław PEŁCZEWSKI
Tadeusz PUCHAŁKA	Leszek RUTKOWSKI
Stanisław SKOCZOWSKI	Roman SŁOWIŃSKI
Jerzy ŚWIĄTEK	Andrzej ŚWIERNIAK
Ryszard TADEUSIEWICZ	Piotr TATJEWSKI
Krzysztof TCHOŃ	Leszek TRYBUS
Jan WĘGLARZ	Andrzej P. WIERZBICKI

KOMITET ORGANIZACYJNY

Przewodniczący	Roman KULIKOWSKI
Zastępcy Przewodniczącego	Janusz KACPRZYK
	Stanisław KACZANOWSKI
	Tadeusz KACZOREK
	Krzysztof MALINOWSKI
Członkowie	Roman OSTROWSKI
	Tadeusz PUCHAŁKA
	Dariusz WAGNER
Sekretarze naukowi	Jan STUDZIŃSKI
	Jan W. OWSIŃSKI

ISBN 83-89475-01-4

Druk: ARGRAF, Warszawa

OPTYMALIZACJA
I PODEJMOWANIE DECYZJI

WIELOKRYTERIALNA SELEKCJA WARIANTÓW ROZWOJU INFRASTRUKTURY SIECIOWEJ

Stanisław ŁUKASIK

Instytut Badań Systemowych PAN Warszawa
ul. Newelska 6, 01-447 Warszawa e-mail: lukasik@ibspan.waw.pl

Streszczenie: W niniejszej pracy podjęto próbę zastosowania formalizmów kombinatorycznej optymalizacji wielokryterialnej, do modelowania rozwoju systemów infrastruktury sieciowej. Rozpatrujemy zadanie wyboru docelowego wariantu tej infrastruktury sieciowej. Przyjęta zasada skalaryzacji wektorowej funkcji celu wyraża zasadę optymalizacji wskaźnika efektywności inwestycji. Podano sposób implementacji proponowanej metody do sieci drogowej.

Słowa kluczowe: Modelowanie rozwoju infrastruktury sieciowej, wielokryterialna optymalizacja dyskretna, systemy transportowe.

1. WSTĘP

W pracy przedstawiono zastosowanie optymalizacji wielokryterialnej do modelowania rozwoju systemów infrastruktury sieciowej. Zaproponowane podejście nawiązuje do praktyki projektowania rozwoju aglomeracji, która w skrócie sprowadza się do następujących faz:

- zestawienie eksperckiego zbioru wariantów stanu docelowego infrastruktury sieciowej na końcu wieloletniego horyzontu planowania,
- wybór kolektywnie preferowanej wizji stanu docelowego, ze zbioru wariantów ,
- szczegółowe opracowanie elementów stanu docelowego,
- określenie harmonogramu realizacji stanu docelowego.

W prezentowanej pracy koncentrujemy się na drugim etapie, tzn. wyznaczaniu preferowanego stanu docelowego rozważanej infrastruktury sieciowej, na końcu horyzontu planowania. Stan ten powstaje poprzez dodanie do sieci początkowej zbioru nowych węzłów i krawędzi grafu, wybieranych z dopuszczalnego zbioru wariantów oraz modernizację istniejących elementów sieci. Elementy nowe oraz modernizowane zestawione są w tzw. łańcuchy rozwojowe, zestawione w zbiór dopuszczalny.
W grafie sieci wydzielono podzbiór węzłów, które w momencie początkowym są odosobnione. Węzły te wyznaczają kierunki przestrzennego rozwoju sieci.
Przyjęta wektorowa funkcja celu wyraża:

- koszty rozwoju sieci, obejmujące koszty bezpośrednie i towarzyszące,
- wskaźnik szkodliwości środowiskowej,
- wskaźnik sprawności funkcjonalnej systemu.

Proponowane podejście przedstawimy w odniesieniu do sieci drogowej, jednakże możliwe jest uogólnienie tych rozważań na inne typy infrastruktury sieciowej.
W sformułowaniu tym dokonamy skalaryzacji drugiej i trzeciej składowej funkcji celu, tworząc zagregowany wskaźnik sprawności funkcjonalnej systemu.
Układ pracy jest następujący.
W pierwszej części rozpatrujemy model rozwoju sieci, natomiast w drugiej omawiamy specyficzne własności tego modelu w terminach kombinatorycznej optymalizacji wektorowej.
Koncepcję algorytmiczną rozważamy w kolejnym punkcie. Rozważany algorytm określić można jako adaptacyjny, dwupoziomowy wariant gradientu dyskretnego w odniesieniu do zastępczego zadania dwukryterialnego.
Wyjściowymi rezultatami omawianej procedury są stan docelowy infrastruktury sieciowej, na końcu przyjętego horyzontu czasowego oraz uszeregowanie zakwalifikowanych do realizacji łańcuchów rozwojowych wg wskaźnika korzyści.
Niniejsza praca oprócz aspektów aplikacyjnych, kreuje problemy formalne z dziedziny badań operacyjnych, związanych z wyznaczaniem rozwiązań wielokryterialnych dla dyskretnych i dyskretno- ciągłych zadań kombinatorycznych. Istotną wartość posiada parametryczna charakterystyka rozwiązania względem globalnej kwoty środków finansowych, której określenie jest następnym zadaniem.

2. DWUETAPOWY MODEL EWOLUCJI SYSTEMU

2.1. Opis matematyczny

Oznaczenia:
graf sieci w momencie $t = t_0, t_f$,

$$\Gamma(t) = \langle I(t), E(t), D(t), K(t) \rangle \tag{1}$$

gdzie : $I(t)$ – zbiór węzłów , $E(t)$ – zbiór krawędzi, $D(t)$ – zbiór długości krawędzi, $K(t)$ - klasy funkcjonalności krawędzi grafu sieci, t_0, t_f - etapy początkowy i końcowy, horyzontu planowania,

$Q(t) = \{q^e(t)\}_{e\in E}$ - obciążenie eksploatacyjne krawędzi sieci, $\hat{q}^e$ - normatywne obciążenie eksploatacyjne krawędzi $e\in E$, $\rho(q^e,\hat{q}^e)$ - funkcja strat, wynikających z eksploatacyjnego przeciążenia krawędzi $e\in E$,

$G(t_f) = \{g_{ij}\}_{i,j\in I(t_f)\cup J(t_f)}$ - prognozowana intensywność potoków obciążenia sieci, generowanych przez węzły $i,j\in I(t_f)$, w końcu okresu planowania,

$J(t_0)$ – zbiór rozwojowych węzłów grafu sieci , izolowanych w etapie t_0, F – najbardziej prawdopodobna wartość sumarycznych środków finansowych, własnych i uzyskiwanych z zewnątrz w przedziale planowania, φ - dodatkowe środki finansowe, uzyskiwane drogą kredytową,

$\omega(t) = \sum_{e\in E(t)}\omega_e(t)$ – zagregowany wskaźnik funkcjonalności systemu, - $\upsilon(t)$ wskaźnik szkodliwości środowiskowej krawędzi e,

$\Xi=\{\vartheta_l\}_{l\in L}$ - zbiór dopuszczalny łańcuchów rozwojowych sieci, gdzie $\vartheta^k{}_l=\{\varepsilon^k{}_l, e_l\}$ - pojedynczy łańcuch rozwojowy, w klasie k, zawierający ciąg nowo - kreowanych krawędzi ε_l^k oraz istniejących $e_l\in E(t_0)$, ulepszanych krawędzi grafu sieci,

$\vartheta^l=\{\vartheta_l^k\}_{k\in K'}$ - podzbiór łańcuchów rozwojowych o jednakowym przebiegu lecz różnych klasach funkcjonalności,

$\psi^k{}_l$ - sumaryczny koszt realizacji łańcucha l, w klasie k,

κ - poziom dopuszczalnego zadłużenia,

u_l^k - zmienna decyzyjna zagregowana odnosząca się do łańcucha $l\in L$,

$$u^k{}_l=\begin{cases}1-\text{gdy } l-\text{ty lancuch bedzie realizowany w klasie k,}\\ 0-\text{w przeciwnym przypadku}\end{cases}$$

Model tranzycji opisujący przejście od stanu początkowego

$$[\Gamma(t_0)\ ,Q(t_0),\omega\ (t_0)],$$

do stanu docelowego $[\Gamma(t_f)\ ,\ Q(t_f)\ ,\omega\ (t_f)]$, sformułujemy dla sieci drogowej. Dla uproszczenia opisu, rozpatrzymy tylko zmiany zbioru krawędzi grafu sieci. Zmienna Q(t) oznacza wówczas natężenie ruchu pojazdów, $\hat{q}^e$ - normatywne natężenie ruchu dla krawędzi e, k^e - klasę drogową krawędzi e, określającą ilość pasów ruchu oraz nośność nawierzchni, wskaźnik szkodliwości środowiskowej, $\upsilon^e(t)$ - wyraża generalnie koszty wypadków drogowych, zaistniałych na danym odcinku drogi, w określonym czasie, np. w ciągu roku na łuku drogowym $e\in E(t)$, $\omega(t)$ jest zagregowanym wskaźnikiem funkcjonalności transportowej

$$\omega(t)=\sum_{e\in E(t)}\upsilon^e(q^e(t))d^e\,k^e(t)\,\rho\left(\frac{q^e(t)}{\hat{q}^e}\right) \quad (2)$$

Przyjęto, że operator ewolucji natężenia ruchu pojazdów A_Q wyraża zasadę transportu po najkrótszych drogach, dla określonego stanu sieci drogowej. Przejście od stanu początkowego do stanu docelowego], indukowane jest przez zmienne decyzyjne $u_l\in\{0,1\}$, $l\in L$. Uzupełniającą zmienną decyzyjną modelu jest wartość dodatkowych środków finansowych φ.

Propozycja 1. Model ewolucji systemu transportowego ma postać

$$\Gamma(t_f)=A_\Gamma(\Gamma(t_o),u)), \quad (3)$$

$$Q(t_f)=A_Q(Q(t_0),\Gamma(t_f)) \quad (4)$$

$$\omega(t_f)=A_w(\omega(t_0),\Gamma(t_f),Q(t_f)) \quad (5)$$

$$\sum_{l\in L'}\sum_{k\in K'}u_l^k\,\psi^k{}_l\le\Phi(t_0)+F+\varphi \quad (6)$$

$$\frac{\varphi}{F}\le\kappa\ , \quad (7)$$

przy stanie początkowym: $Q(t_o)$, $\Gamma(t_0)$, $\Phi(t_0)$, $\omega(t_0)$.

*

Powyżej A_Γ, A_Q, A_ω oznaczają odpowiednie operatory tranzycyjne.

Dwukryterialna funkcja celu ma postać:

$$\mathfrak{I}(u,\varphi)=\begin{Bmatrix}\sum_{l\in L'}\sum_{k\in K'}u^k{}_l(\psi^k{}_l+\eta_l)+\varphi\\ \sum_{e\in E'(t_f)}k_e\,\rho_e(q^e,\hat{q}^e)\upsilon^e(q^e(t_f))d^e\end{Bmatrix} \quad (8)$$

Interpretacja powyższych formuł jest następująca. Równanie (3) opisuje w sposób uogólniony ewolucję stanu sieci, która w formie bardziej szczegółowej odnosi się do zbiorów E, K, I, D

(por. (9) - (12)). Zależność (4) określa ewolucję zbioru natężeń ruchu., wyznaczanych i wg zasady najkrótszej drogi, natomiast (5) wyznacza wskaźnik funkcjonalności. Zależności (6) i (7) określają uwarunkowania finansowe procesu rozwoju.

Formuła (8) określa dwuwymiarową funkcję celu. Jej pierwsza składowa wyznacza sumaryczne koszty inwestycyjne (techniczne ψ i środowiskowe η), oraz koszt kredytu, natomiast druga składowa określa zagregowany wskaźnik funkcjonalności transportowej (2).

Następujące formuły opisują ewolucję grafu sieci

$$E(t_f)=E(t_0)\cup H_e(u),\quad I(t_f)=I(t_0)\cup H_I(u)$$

$$D(t_f)=D(t_0)\cup H_d(u), \quad (9)$$

$$k_e(t_f)=\begin{cases} k_e(t_o)-\text{gdy } u_e^l=0,\ e\in E(t_o) \\ k_l-\text{gdy } u_e^s=1,\ e\in\vartheta_l^k, l\in L \end{cases} \tag{10}$$

$$k_e(t_f)=\begin{cases} k-\text{gdy } u_l^k=1-\text{dla } e=\varepsilon_l^k\in\vartheta_l^k \\ 0 \end{cases} \tag{11}$$

gdzie $H_e(u)=\{e_l\in\vartheta_l, l\in L\ :u_l=1\}$,
$H_d(u)=\{d_l\in\vartheta_l, l\in L\ :u_l^k=1\}$

$$\omega_e(t_f)=\begin{cases} \omega_e(t_0,q(t_f))-\text{gdy}: u_{l,e}^k=0-\text{dla } e\in E(t_0), \\ \omega_l^k(q(t_f))-\text{gdy}: u_{l,e}^k=1-\text{dla } e\in\vartheta^k{}_l, l\in L \end{cases}$$

(12)

2.2. Charakterystyka modelu

Rozważane zadanie optymalizacji wielokryterialnej potraktujmy jako przekształcenie

$$\Im:U(\varphi)\to\Psi\subset R^n,$$

gdzie: $\Im$ jest agregatem operatorów A_Γ, A_Q, A_ω, Ψ jest zbiorem kryteriów osiągalnych, natomiast $U=U(\varphi)$ – zbiorem decyzji, odnoszących się do zbioru łańcuchów Ξ.
Zadanie (3) – (8) zapiszemy w zwartej formie

$$\min_{u\in U,\varphi\in[0,\varphi_{max}]} \Im(u)$$

$$U=\{u_l\in\{0,1\}: \sum_{l\in L}\sum_{k\in K} u_l^k\psi^k{}_l\le\Phi+\varphi\ ,\ \sum_{k\in K}u_l^k\le 1,\ \forall l\in L\} \tag{13}$$

Zauważmy, ze zadanie (13) interpretować można w terminach wielokryterialnej optymalizacji kombinatorycznej, w następujący sposób.
Dopuszczalny zbiór łańcuchów rozwojowych $\Xi=\{\vartheta_l\}_{l\in L}$ jest zbiorem ograniczonym. Tworzymy zbiór wariantów rozwiązań $\{\Theta_m\}_{m\in M}$, będących podzbiorami zbioru Ξ, bez repetycji, spełniających warunek kosztów (6). Następnie każdemu zbiorowi Θ_m przyporządkowujemy wektorową funkcję celu $\Im(\Gamma^0,\Theta_m))$.
Rozpatrujemy zadanie poszukiwania podzbioru łańcuchów $\Theta_m\subseteq\Xi$, najlepszego w sensie kryterium (8).
Sformułowany powyżej model dyskretnej optymalizacji posiada nast. własności, istotne przy tworzeniu algorytmów;

a) wartość funkcji celu dla określonego zbioru łańcuchów rozwojowych Θ_m nie zależy od porządku elementów, tzn. wszystkie permutacje elementów charakteryzują się taką samą wartością funkcji celu,
b) składowe wektorowej funkcji celu posiadają strukturę addytywną względem elementów sieci,
c) ograniczenie nierównościowe (6) jest kluczowym ograniczeniem zadania, nadaje mu ono charakter uogólnionego wektorowego zadania załadunku, z tym istotnym zastrzeżeniem , że elementy decyzyjne są tylko częściowo niezależne w sensie struktury matroidowej,
d) można przyjąć , że zagregowany wskaźnik sprawności funkcjonalnej systemu (2) zależy słabo monotonicznie od kosztów inwestycyjnych, co pozwala określać monotoniczne szeregi współczynników wymienialności przyrostów odpowiednich składowych wektorowej funkcji celu, tzn. kosztów i wskaźnika sprawności funkcjonalnej ω (współczynniki wymienialności odpowiadają w istocie gradientom dyskretnym tego wskaźnika),
e) składowa funkcji celu wyrażająca koszty, powiązana jest bezpośrednio z prawą stroną ograniczeń (6), co pozwala sformułować jednokryterialne zadanie parametryczne, dla zagregowanego wskaźnika sprawności funkcjonalnej,
g) wprowadzenie do modelu zbioru węzłów odosobnionych J, pozwala określić stopień spełnienia „rozwojowych" zapotrzebowań transportowych systemu,
h) finalny rezultat analizy wielokryterialnej powinien odpowiadać jednemu elementowi zbioru Pareto.

3. KONCEPCJA ALGORYTMICZNA

Generalnie porównywanie rozwiązań wielokryterialnych oparte jest na odpowiednio zdefiniowanym porządku indukowanym w przestrzeni kryteriów. W niniejszej pracy przyjmujemy porządek określony przez specyficzna funkcję skalaryzujacą.

***Propozycja** 2.* Jako funkcję skalaryzującą kryterium wektorowego $\lambda:\Psi\to R^1$, przyjmiemy wskaźnik efektywności inwestycji o postaci

$$\lambda=\frac{\omega(t_0)-\omega(t_f)}{\sum_{l\in L}\sum_{k\in K_l} u_l^k(\psi_l^k+\eta_l^k)} \tag{14}$$

Oznaczymy przez $\Pi(\Psi)\subseteq\Psi$ zbiór elementów przestrzeni Ψ, niedominujących w sensie stożka dodatniego, oraz przez $W(\Pi)\subseteq U$ - podzbiór decyzji odpowiadających zbiorowi Π.
Poszukiwać będziemy łańcucha krawędzi $\vartheta^0\in\Xi$, który włączony do grafu sieci, zapewni fukcję celu $\psi^0\in\Pi^0\subseteq\Psi$, odpowiadającą minimalną wartość funkcji (16).

***Propozycja** 3.* Do wyznaczania rozwiązań zastosujemy następujący algorytm wielofazowy;

Faza I: Wyznaczamy rozwiązanie „ centralne":

$$\hat{\omega}=\min_{u\in U}\omega(t_f)\ |\ \text{przy warunkach}\,(3)-(7),\text{oraz}\ \varphi=0, \tag{15}$$

Faza II: Wyznaczamy $\varphi \geq 0$, charakterystykę parametryczną $\hat{\omega}(\varphi)$, rozwiązując zadanie

$$\hat{\omega}(\varphi) = \min_{u \in U} \omega(t_f) \mid \text{przy warunkach (3)} - (7), \text{ oraz } \varphi > 0, \tag{16}$$

dla zbioru wartości $\varphi \in [0, \varphi_{max}]$.

Dla każdego rozwiązania określamy funkcjonał

$$\lambda = \frac{\omega(t_0) - \omega(t_f)}{\sum_{l \in L} \sum_{k \in K_l} u_l^k (\psi_l^k + \eta_l^k)}$$

Faza III: wybieramy interaktywnie preferowaną wartość φ oraz odpowiadające jej rozwiązanie zadania

$$\min_{u \in U_{\dots}} \omega(t_f) \mid \text{przy warunkach (3)} - (7), \text{ oraz ustalonym } \varphi \geq 0 \tag{17}$$

W fazach II i III wykorzystujemy jakościową charakterystykę parametryczną $\hat{\omega}(\varphi)$, która posiada formę skokową i odcinkami stałą. Kluczową sprawą jest algorytm rozwiązania zadań (16) i (17). Rozpatrywane były; algorytm oparty na gradiencie dyskretnym oraz algorytm genetyczny ([3]}. Ideowy schemat adaptacyjnego algorytmu gradientu dyskretnego dla fazy I wygląda następująco.

Krok 1. Wartości początkowe:
$u_l^k(0) = 0, \quad l \in L, k \in K^l. \quad \omega(0) = \{\omega(u_l^k(0))\}, \Theta = \varnothing$.

Krok 2. Dla każdego z łańcuchów rozwojowych $\Xi = \{\vartheta^k{}_l\}$, określamy zbiór decyzji $^k_l u = \{0 0 \dots u_l^k = 1 0 0 0\}$ oraz gradient dyskretny wskaźnika funkcjonalności transportowej

$$\nabla \omega^k{}_l = \frac{\Delta\omega(t_f)}{\psi_l^k + \eta^l} \quad l \in L, \tag{18}$$

Krok 2. Szeregujemy w porządku rosnącym zbiór wg indeksu greedy, odpowiadającego gradientowi dyskretnemu (18).

Krok 3. Kwalifikujemy łańcuch stojący na pierwszym miejscu $\vartheta_l^k(1)$ do zbioru Θ, modyfikujemy zbiór wariantów $\Xi := \Xi \setminus \vartheta_l^k(1)$, następnie zmieniamy graf sieci wg reguł (9), (10) oraz sprawdzamy warunek (6),

Krok 3. Jeśli warunek (6) jest naruszony – przechodzimy do kroku 5, w przeciwnym przypadku aktualizujemy zbiór wariantów $\Xi(t)$ i przechodzimy do kroku 1.

Stop

MULTICRITERIA CHOICE OF THE PROJECT OF THE NETWORK INFRASTRUCTURE DEVELOPMENT

Abstract. This paper presents the problem of creation of long-term destination structure of an network infrastructure. A two-stage aggregated model of evolution of the network and algorithmic approach is proposed.

Literatura

[1] Current J., Marsh M. (1993) Multiobjective transportation network design and routing problems. *European Journal of Research Operations*, 1, 65.

[2] Climaco J., Antunes H., Alves M. (1993) Interactive decision support for multiobjective transportation problems. *Europ. Journal of Research Operations*, **65**, 1.

[3] Jaszkiewicz A. (2002) Genetic local search for multi-objective combinatorial optimization. *Europ. Journal of Research Operations*, **137**, 1.

[4] Łukasik S. (2000) Discrete multistage optimization. *Proc. Intern. Conference MMAR 2000.*

Instytut Badań Systemowych
Polskiej Akademii Nauk

ISBN 83-89475-01-4