

# OPTIMALIZÁCIA CESTOVNÝCH PORIADKOV S VYUŽITÍM GENETICKÉHO ALGORITMU

## TIMETABLE OPTIMIZATION USING GENETIC ALGORITHM

Gabriel Fedorko<sup>1</sup>, Michal Weiszer<sup>2</sup>

---

*Anotace: Článok je zameraný na implementáciu genetických algoritmov pre zostavenie a optimalizáciu cestovného poriadku vo verejnej doprave. Efektívnosť takéhoto prístupu je prezentovaná na jednoduchom príklade s použitím platného cestovného poriadku. Navrhnuté riešenie dokázalo minimalizovať celkový čas čakania a prestupu cestujúcich..*

*Kľúčová slova: Optimalizácia cestovných poriadkov, genetické algoritmy*

*Summary: This paper is focusing on implementing genetic algorithm based solution for vehicle scheduling and timetable optimization in public transportation. Effectiveness of a such approach is demonstrated on a simple example with real data from timetables. Developed solution lowered the overall waiting and transfer time of passengers.*

*Key words: Timetable optimization, genetic algorithms*

### 1. ÚVOD

Genetické algoritmy (GA) patria medzi skupinu optimalizačných a vyhľadávacích algoritmov. Od svoho publikovania v roku 1975 patria medzi perspektívne a intenzívne sa rozvíjajúce techniky pri riešení problémov v mnohých vedných oblastiach.

Výhodou GA je ich aplikovateľnosť na rôzne druhy dát, a ich nezávislosť ktorá umožňuje použitie pre široké spektrum riešených problémov. GA sa používajú pre riešenie zložitých úloh, ktorých optimalizácia je klasickými metódami náročná a zdĺhavá (napr. NP-hard úlohy). Medzi dopravné úlohy riešené pomocou GA patria cesty v dopravných sieťach [1], tvorba cestovných poriadkov [2], [3], alebo úloha obchodného cestujúceho (Travelling salesman problem).

### 2. POPIS GENETICKÉHO ALGORITMU

GA predstavujú optimalizačné algoritmy inšpirované prirodzeným výberom na základe Darwinovej teórie a genetikou. Použitie algoritmu je univerzálne, s možnosťou aplikácie na riešenie širokého spektra problémov z rôznych oblastí. GA nie sú zložitú na pochopenie a

---

<sup>1</sup> doc. Ing. Gabriel Fedorko, PhD., TU Košice, Faculty BERG, Park Komenského 14, Košice, tel.: +4210556023143, e-mail: [gabriel.fedorko@tuke.sk](mailto:gabriel.fedorko@tuke.sk)

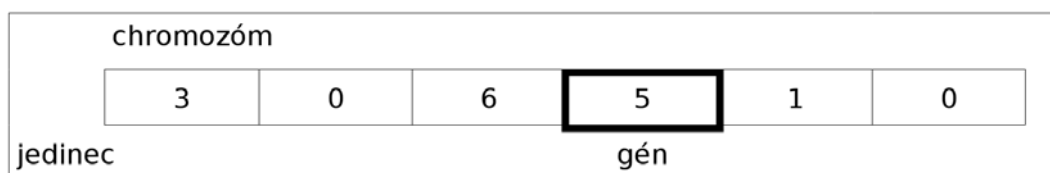
<sup>2</sup> Bc. Michal Weiszer, TU Košice, Fakulta BERG, Park Komenského 14, Košice

potrebný počítačový program má jednoduchú štruktúru. Koncept GA bol vytvorený J. Hollandom a publikovaný v roku 1975. Základné časti GA sú nasledovné:

- množina jedincov, populácia, predstavujúca jednotlivé riešenia problému,
- spôsob výpočtu, ohodnotenie každého jedinca, vyjadrujúce vhodnosť daného riešenia,
- metóda vytvorenia vhodnejšieho jedinca (riešenia), spájaním fragmentov najlepších jedincov (reprodukcia),
- operátor mutácie na predchádzanie straty diverzity v rámci riešení [4].

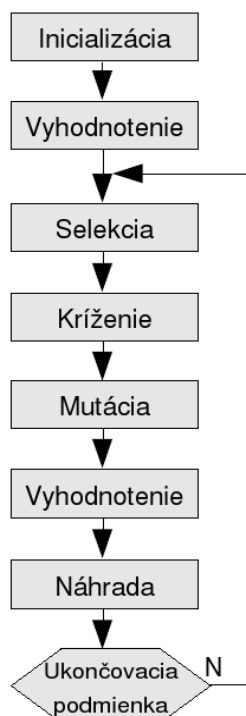
Dôvod použitia GA na hľadanie optimálneho riešenia oproti tradičným metódam spočíva v skutočnosti, že GA sa ukázali ako vhodná metóda schopná riešiť komplexné úlohy, pri ktorých riešenie pomocou tradičných metód je obtiažne resp. nemožné [4].

Jednotlivé riešenia problému predstavujú jedincov populácie. Jediniec je charakterizovaný svojím chromozómom, ktorý sa skladá z viacerých prvkov tzv. génov pričom každý z génov kóduje jednu vlastnosť. Reprezentácia génov môže byť v závislosti na riešenom probléme binárny reťazec, reálne číslo, reťazec celých čísel a pod.



Zdroj: Autor

Obr. 1 – Jediniec s 1 chromozómom reprezentovaný celočíselným reťazcom



Zdroj: Autor

Obr. 2 – Základná schéma genetického algoritmu

Vyhľadávací proces najlepšieho riešenia daného problému je vykonávaný na populácii jedincov postupným opakovaním algoritmu. Každý jediniec je ohodnotený hodnotou,

vyjadrujúcou jeho vhodnosť (fitness). Selekcia jedincov potom prebieha na základe vhodnosti, čím je zabezpečená postupná iterácia populácie smerom k lepším riešeniam (s vyššou hodnotou vhodnosti).

Činnosti vykonávané počas behu GA vytvárajú základnú schému GA (Obr. 2). V bloku *Inicializácia* sa vygeneruje počiatočná generácia, pozostávajúca z náhodne vytvorených jedincov. Blok *Vyhodnotenie* určí vhodnosť každého jedinca, na základe čoho následne blok *Selekcia* určí jedincov vhodných na rozmnožovanie, ktoré zabezpečí blok *Kríženie*. Niektorý jedinci podstúpi *Mutáciu*. Blok *Náhrada* nahradí populáciu novou. Uvedený cyklus sa opakuje do splnenia *Ukončovacej podmienky*.

### 3. IMPLEMENTÁCIA GENETICKÉHO ALGORITMU

Možnosti genetického algoritmu sú demonštrované na nasledujúcej jednoduchšej úlohe.

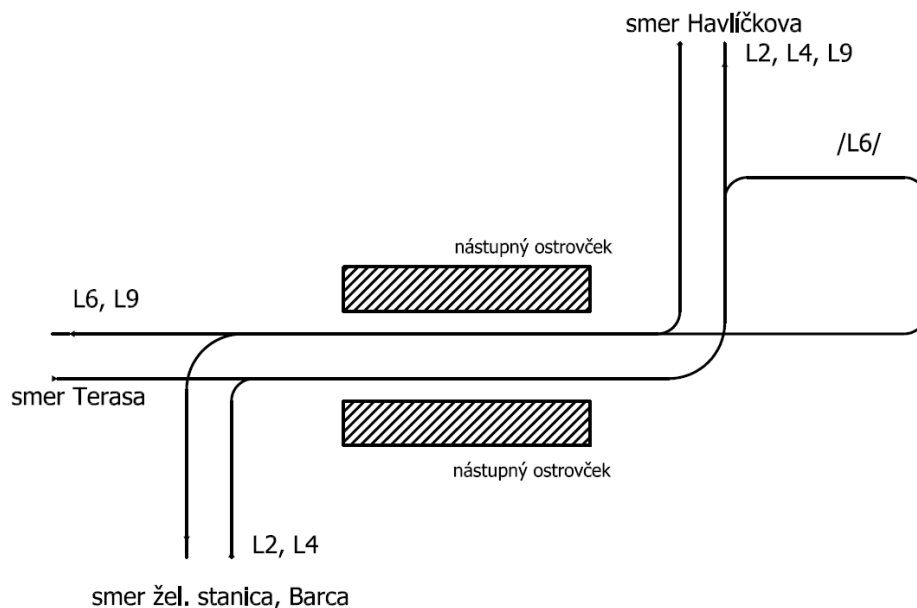
#### 3.1 Formulácia úlohy

Úlohou je určiť odchody spojov (koordináciu) jednotlivých liniek počas zvoleného obdobia zo zastávky Námestie Maratónu mieru v Košiciach tak, aby sa minimalizoval čas čakania a čas prestupu cestujúcich. Časové obdobie je určené od 7:00 do 7:59 počas pracovných dní, teda v čase špičky.

Električková zastávka Námestie Maratónu mieru je prestupným uzlom a zároveň významným zdrojom/cieľom ciest cestujúcich vzhľadom na svoju polohu v centre mesta. Zastávkou prechádzajú linky č. 2, 4, 6, 9, pričom pre linku č. 6 je konečnou resp. východnou zastávkou. Okrem uvedených liniek zastávkou prechádza aj linka R3, pričom pre jej špecifický účel sa s ňou v úlohe ďalej neuvažuje. Prestup medzi linkami je bezkolízny, v rámci jedného nástupného ostrovčeka, prípadne z druhého ostrovčeka. Schéma zastávky je zobrazená na obrázku (Obr. 3).

V rámci analýzy času čakania je potrebné zdefinovať koordináciu medzi odchodmi liniek, ktoré majú spoločný smer (preklad odchodov). Na základe smeru sú zostavené 4 dvojice liniek, pri ktorých je žiaduca koordinácia odchodov spojov:

- L2 a L4 pre smer Havlíčkova,
- L2 a L4 pre smer Staničné námestie/Socha Jána Pavla II.,
- L6 a L9 pre smer NMM/Havlíčkova,
- L6 a L9 pre smer Staničné námestie/Vážecká.



Zdroj: Autor

Obr. 3 – Schéma zastávky Námesť Maratónu mieru

V rámci analýzy prestupných väzieb je potrebné definovať možné prestupy. Z celkovej množiny všetkých variácií prestupných dvojíc, ktorých počet je 8! vrátane prestupu v rámci spojov tej istej linky, je potrebné vylúčiť nelogické prestupy. Prestupy, s ktorými bolo uvažované sú uvedené v tabuľke:

Tab. 1 - Prestupné variácie

Kmeňový spoj (z)		Prestupný spoj (na)	
Linka	Smer	Linka	Smer
L2	Staničné námestie	L6/L9	Staničné námestie/Važecká
L4	Socha Jána Pavla II. (Barca)	L6/L9	Staničné námestie/Važecká
L6	Námestie Maratónu mieru (konečná)	L2/L4	Havlíčková

Pri prestupe z linky L6 na smer Havlíčkova je možné využiť najbližší nasledujúci spoj ktorejkoľvek z liniek L2 alebo L4. Prestup z liniek L2 a L4 na L9 je zahrnutý kvôli rovnakému smeru linky L9 s linkou L6.

### 3.2 Matematický model

Základnou časťou implementácie GA pre riešenie úlohy je vytvorenie reprezentácie riešenia a definovanie funkcie vhodnosti.

Zo zadania úlohy vyplýva, že riešením je hľadaná množina  $X$ , kde každý prvok  $T_j$  je množinou odchodov pre danú linku a smer:

$$X = \{T_1, T_2, \dots, T_j\}, j = 8$$

$$T_j = \{t_{j1}, t_{j2}, \dots, t_{jn}\}$$

, kde  $j$  je celkový počet liniek (každý smer je započítaný zvlášť).

Funkcia vhodnosti je vyjadrená celkovým časom čakania a prestupu cestujúcich pre jednotlivé riešenia úlohy.

$$t_{celk} = t_{\bar{c}} + t_{pre} \quad (1)$$

Kde:

$t_{celk}$ – celkový čas čakania a prestupu,	[min]
$t_{\bar{c}}$ – čas čakania cestujúcich,	[min]
$t_{pre}$ – čas prestupu.	[min]

Čas čakania na spoj je podľa definície čas meraný od príchodu cestujúceho na zastávku hromadnej osobnej dopravy po odjazd dopravného prostriedku požadovaného spoja. Celkový čas čakania všetkých cestujúcich je následne možné vyjadriť ako súčet jednotlivých časov čakania každého cestujúceho, čo je rovné súčinu počtu cestujúcich a priemerného času čakania (pri predpoklade presnej a pravidelnej dopravy) pre všetky spoje a linky:

$$t_{\bar{c}} = \sum_l \sum_k c_{lk} \bar{t}_{\bar{c}} = \sum_l \sum_k O_h \cdot t \cdot \frac{t}{2} \quad (2)$$

Kde:

$l$ – počet liniek,	[-]
$k$ – počet spojov linky $l$ ,	[-]
$c_{lk}$ – počet cestujúcich čakajúcich na $k$ -ty spoj linky $l$ ,	[osoba]
$O_h$ – intenzita prepravného prúdu,	[osoba.min <sup>-1</sup> ]
$\bar{t}_{\bar{c}}$ – priemerný čas čakania na spoj.	[min]
$t$ – čas medzi odchodmi dvoch spojov.	[min]

Počet cestujúcich prichádzajúcich na zastávku je závislý od intenzity prepraveného prúdu  $O_h$ . Pri predpoklade konštantnej hodnoty intenzity (a rovnakej pre všetky linky) počas určeného obdobia počet cestujúcich rovnomerne rastie v závislosti od času. Intenzita cestujúcich v modelovej úlohe je rovná zvolenej hodnote 1 osoba/min.

Čas prestupu je podľa definície súčtom času chôdze pri prestupe medzi výstupnou a nástupnou zastávkou liniek, medzi ktorými dochádza k prestupu a času čakania na následný spoj. Prestup medzi linkami na zastávke Námestie Maratónu mieru prebieha v rámci toho istého nástupného ostrovčeka, resp. ostrovčeka pre opačný smer, preto čas chôdze pri prestupe nie je uvažovaný. Celkový čas prestupu sa následne vypočíta:

$$t_{pre} = \sum_l \sum_k \sum_j \sum_i (t_p - t_{kmeň}) \cdot c_{pre} \quad (3)$$

Kde:

$t_{pre}$ – celkový čas prestupu,	[min]
$j, l$ – počet liniek,	[-]
$k$ – počet spojov linky $l$ ,	[-]
$i$ – počet spojov linky $j$ ,	[-]
$t_p$ – čas odchodu spoja linky $j$ , na ktorý sa prestupuje,	[min]
$t_{kmeň}$ – čas odchodu kmeňového spoja linky $l$ ,	[min]

$c_{pre}$  – počet cestujúcich prestupujúcich medzi kmeň. a prestup. spojom. [osoba]

Za prípustný prestup sa v rámci riešenia úlohy považuje časový úsek, ktorý je väčší ako 0 minút. Z definície odchodu spoja ako celočíselnej hodnoty následne vyplýva, že minimálny čas prestupu je 1 minúta. Dolným obmedzením času prestupu sa vylúčia prestupy medzi spojmi s rovnakým časom odchodu, ktoré nie sú prípustné, keďže môžu byť ovplyvnené už malým meškaním spojov. Za akceptovateľný prestup z hľadiska kvality prestupu sa považuje v úlohe časový úsek menší alebo rovný 5 minútam. Uvedené hranice sú zvolené v rámci riešenia úlohy a je ich možné meniť v závislosti od modelovanej situácie. Rozdielne hranice budú v prípade prestupu z MHD na prímestkú dopravu, vlak, prestupy v rámci medziregionálnej dopravy a pod., ktoré vyjadrujú rozdielny typ a správanie cestujúcich. Požiadavky na kvalitu prestupu v MHD od 1 do 5 minút nemusia byť optimálne v prípade prestupu z vlaku na vlak a pod.

Počet prestupujúcich cestujúcich pre každý prestup v modelovej úlohe je rovný zvolenej hodnote 1 osoba.

Z uvedených rovníc vyplýva matematický model úlohy a funkcia vhodnosti:

$$\text{Minimalizovať } \sum_l \sum_k O_h \cdot \frac{(t_{l(k+1)} - t_{lk})^2}{2} + \sum_l \sum_k \sum_j \sum_i \alpha_{lj} (t_{lk} - t_{ji}) \cdot c_{ki}^{lj}$$

Pri podmienkach:

$$t_{lk} - t_{ji} \geq 1 \quad \forall l, k, j, i, \alpha_{lj} = 1 \quad (1)$$

$$t_{lk} \in (0, 60) \quad \forall l, k \quad (2)$$

$$t_{l(k+1)} - t_{lk} = i_l \quad \forall l, k \quad (3)$$

$$\alpha_{lj} \in \{0, 1\} \quad \forall l, j \quad (4)$$

Rovnica matematického modelu vychádza zo vzťahu (1), doplnením vzťahov (2) a (3). Podmienka (1) zabezpečuje minimálny čas prestupu 1 minúta pre spoje liniek medzi ktorými je definovaný prestup, podmienka (2) vyjadruje určené časové obdobie v ktorom sa hľadajú odchody (1 hodina). Podmienka (3) zabezpečuje, že čas medzi odchodmi dvoch nasledujúcich spojov linky  $l$  je rovný intervalu na danej linke. Premenná  $\alpha_{lj}$  z podmienky (4) nadobúda hodnotu 1 ak je medzi spojmi linky  $l$  a linky  $j$  definovaný (možný) prestup, pričom medzi spojom  $k$  linky  $l$  a spojom  $i$  linky  $j$  prestupuje  $c_{ki}^{lj}$  cestujúcich.

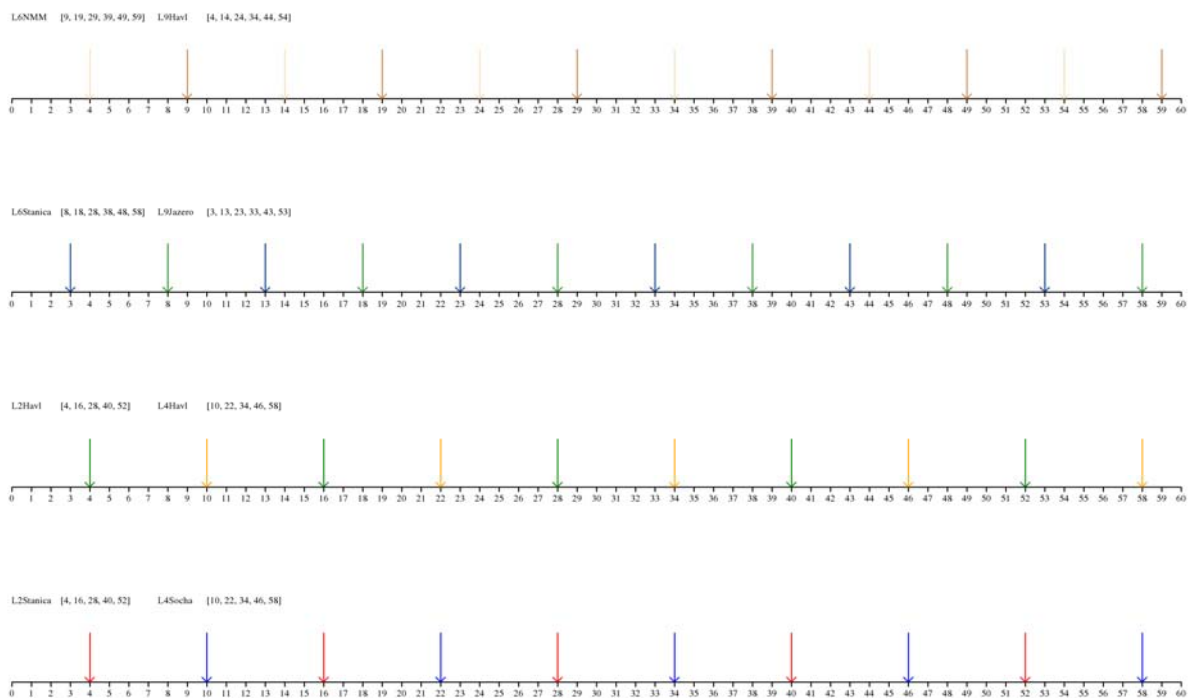
### 3.3 Základné parametre algoritmu

Pre riešenie úlohy a implementáciu GA je využitá knižnica Pygene pre programovací jazyk Python. Knižnica obsahuje vopred definované triedy a funkcie pre vytváranie GA a genetické programovanie s možnosťou prispôsobenia pre riešený problém. Následne sa matematická formulácia problému prevedie do štruktúry vlastného programu. Základné parametre GA, ktoré je potrebné definovať a zostávajú počas realizácie pokusov nemenné sú definované nasledovne:

- počet pokusov pre každý variant (s pevnou/premenlivou dĺžkou intervalov),
- počet generácií generovaných v rámci jedného pokusu,
- počet potomkov v rámci jednej generácie,
- veľkosť populácie, udáva počet jedincov ktorí sa ponechajú z potomkov,
- počiatočná veľkosť populácie pri generovaní náhodnej prvej generácie,
- pravdepodobnosť mutácie jedného génu,
- stupeň mutácie jedného génu, udáva hodnotu o ktorú sa zmení gén pri mutácii.

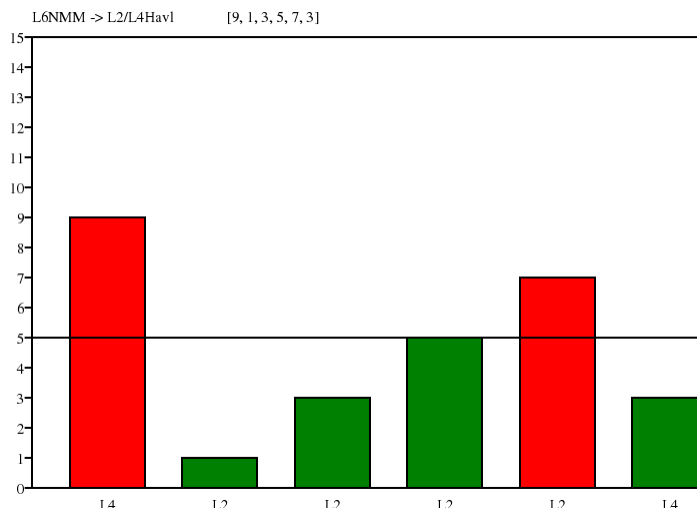
#### 4. VÝSLEDKY GA

Genetický algoritmus našiel hodnoty odchodov spojov, ktoré sú zobrazené na obrázku (Obr. 4). Nájdené riešenie znížilo celkový čas čakania a čas prestu cestujúcich oproti stavu podľa súčasne platného cestovného poriadku. Obrázky (Obr. 5) a (Obr. 6) znázorňujú čas prestupu medzi jednotlivými spojmi, pričom (Obr. 5) ukazuje stav pred optimalizáciou a (Obr. 6) po optimalizácii genetickým algoritmom.



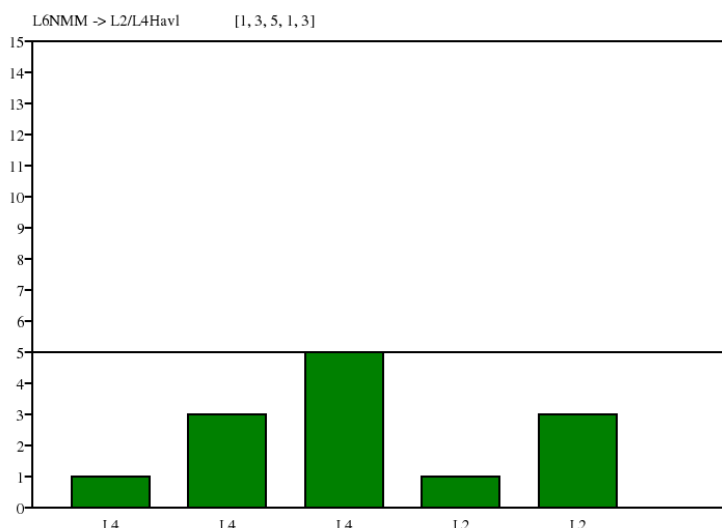
Zdroj: Autor

Obr. 4 – Odchody spojov nájdené GA



Zdroj: Autor

Obr. 5 – Čas prestupu nulového variantu



Zdroj: Autor

Obr. 6 – Čas prestupu po optimalizácii

## 5. ZÁVER

Implementácia, zostavenie GA a nájdené výsledky pre danú úlohu optimalizácie cestovných poriadkov na zastávke Námestie Maratónu mieru v Košiciach preukázali vhodnosť takéhoto prístupu pri riešení dopravných úloh. Získaný návrh riešenia predstavuje široko použiteľný koncept aplikovateľný na rozličné prípady, resp. pre celkovú optimalizáciu dopravnej siete. Vyvinuté riešenie umožní v budúcnosti postupné rozširovanie záberu optimalizácie a bude použité na stanovenie cestovných poriadkov na sieti električkovej dopravy v Košiciach.



## POUŽITÁ LITERATURA

- [1] JUN, Chulmin. *Route selection in public transport network using GA*. 2005 ESRI International User Conference Proceedings [online]. [cit. 2008-03-10]. Dostupné na internete: <<http://gis.esri.com/library/userconf/proc05/papers/pap1874.pdf>>.
- [2] PARK, Seong Jae. *Bus network scheduling with genetic algorithms and simulation*. University of Maryland, Department of Civil and Environment Engineering, 2005. 93 s. Thesis Directed By: Professor Paul M. Schonfeld.
- [3] CHAKROBORTY, P. - DEB, K. - SUBRAHMANYAM, P.S. *Optimal Scheduling of Urban Transit Systems using Genetic Algorithms*. In: ASCE Journal of Transportation Engineering, Vol. 121, Issue 6, pp. 544-553, ISSN: 0733-947X
- [4] COLEY, David. *An Introduction to Genetic Algorithms for Scientists and Engineers*. World Scientific Publishing, Singapore, 1999. 227 s. ISBN 98-1023-602-6.
- [5] KVASNIČKA, Vladimír - POSPÍCHAL, Jiří - TIŇO, Peter. *Evolučné algoritmy*. STU Bratislava, 2000. ISBN 80-227-1377-5.
- [6] CSONTÓ, Július - PALKO, Martin. *Umelý život*. ELFA, Košice, 2002. 180 s. ISBN 80-89066-59-3
- [7] SUROVEC, Pavel. *Provoz a ekonomika silniční dopravy I*. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava, Ostrava, 2000, s. 119, ISBN 80-7078-735-X.

Recenzenti: Ing. Miroslav Slivoně  
Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra technologie a řízení dopravy  
doc. Ing. Jaromír Široký, Ph.D.  
Univerzita Pardubice, DFJP, Katedra technologie a řízení dopravy