

MODIFIKACIJA FUNKCIJE TROŠKOVA ZAGUŠENJA KOD METAHEURISTIČKOG PRISTUPA U REŠAVANJU PROBLEMA PROŠIRENJA MREŽNIH KAPACITETA

Slobodan Mitrović, Valentina Radojičić, Miodrag Bakmaz
Univerzitet u Beogradu - Saobraćajni fakultet,
s.mitrovic@sf.bg.ac.rs, valentin@sf.bg.ac.rs, bakmaz@sf.bg.ac.rs

Sadržaj: *U radu je predstavljena pogodna modifikacija funkcije troškova zagušenja, koja ima ključnu ulogu kod izbora optimalne strategije za proširenje mrežnih resursa u tačno određenom vremenskom momentu, za unapred definisani stepen iskorišćenosti posmatranog resursa. Predloženi oblik funkcije troškova posebno je pogodan za metaheuristički pristup rešavanju problema mrežnih kapaciteta, što je pokazano numeričkim primerom u slučaju proširenja kapaciteta jednog DWDM linka. Analizirani su uporedni rezultati dobijeni u slučaju rešavanja navedenog problema, sa i bez modifikacije funkcije troškova.*

Ključne reči: *funkcija troškova zagušenja, metaheuristički pristup, proširenje kapaciteta mrežnih resursa*

1. Uvod

Na savremenom tržištu internet usluga može se uočiti sinergija servisa koji integrišu *cloud* tehnologije, *online* softverske pakete i tzv. pametne uređaje (u obliku mobilnih telefona, tablet uređaja, televizora i sl.). Posebno je uočljiva migracija ponude softverskih rešenja, koja su do skoro bila namenjena ekskluzivno za lokalnu instalaciju na računarima, ka novim *online* verzijama, koje se sada mogu koristiti upotrebom internet pretraživača, bez obzira na tip platforme. Intenzitet migracije lokalnih softverskih rešenja ka dostupnim *online* verzijama, prouzrokuje povećan intenzitet prenosa podataka ka *cloud* servisima, što utiče na dodatno povećanje ukupnog obima internet saobraćaja. Publikovani rezultati prognoziranja intenziteta internet saobraćaja ukazuju na ekspanziju rasta broja zahteva [1], čime se implicitno potencira važnost primene odgovarajućih strategija za proširenjem kapaciteta resursa mreže.

Osnovni motiv za primenu optimalne strategije proširenja kapaciteta mrežnih resursa, ogleda se u povećanju profita mrežnih operatora, u kome važan udeo ima i komponenta koja se odnosi na smanjenje troškova eksploatacije raspoloživih resursa. Funkcija troškova zagušenja saobraćaja u brojnim modelima za izbor optimalne strategije za proširenje mrežnih resursa ima posebnu važnost, zbog činjenice da odluka o proširenju kapaciteta određenog resursa, u određenom vremenskom momentu, može biti upravo doneta na osnovu vrednosti nivoa funkcije troškova, za određeni stepen iskorišćenosti

posmatranog mrežnog resursa (na primer, telekomunikacionog linka ili njemu pripadajuće komponente).

Strategije za povećanje kapaciteta resursa mreže najčešće se definišu na nivou celokupne mreže. Sadrže podatke o vremenskom rasporedu proširenja kapaciteta, posebno definisane za svaki element mreže. U zavisnosti od topologije mreže, zastupljena je različita složenost modela za proširenje resursa mreže. U osnovi, značajan broj strategija za proširenje resursa mreže [2 - 12] koristi modele optimizacije koji se često formulišu kao problemi celobrojnog mešovitog programiranja, ili kroz slične matematičke (analitičke) aparate, sa ili bez mogućnosti primene adekvatnih heurističkih rešenja. Upotreba odgovarajućeg matematičkog aparata u procesu razvoja određene strategije rezultuje formiranjem optimalnog rešenja za svaki element posmatrane mreže, uz veoma složen i obiman broj primenjenih proračuna. Međutim, upotreba metaheurističkog pristupa pruža mogućnost razvoja softverskih alata kojim bi se dobilo zadovoljavajuće rešenje, blisko optimalnom, ali uz znatno kraće vreme proračuna i veću jednostavnost primene. Takođe, primetno je da, ukoliko se pojedini parametri i funkcije, prvobitno namenjeni za upotrebu u analitičkim modelima, na pogodan način modifikuju (zadržavajući iste karakteristike), mogu dati bolje rezultate kod metaheurističkog pristupa. Navedene činjenice ukazuju da upotreba metaheurističkog pristupa može biti veoma prihvatljiv pristup u rešavanju problema proširenja mrežnih kapaciteta.

U ovom radu predstavljena je nova modifikacija *Fortz* i *Thorup*-ove funkcije troškova zagušenja [14], kao nastavak istraživanja predstavljenog u [13]. Modifikovana funkcija predstavlja prelaz iz linearnog u konveksni oblik segmenata ove funkcije, čineći je, na taj način pogodnijom za upotrebu u metaheurističkom pristupu.

Nakon uvodnog dela, u drugom poglavlju, predstavljena je uloga funkcije troškova zagušenja, kao i *Fortz* i *Thorup*-ova funkcija. U trećem poglavlju, pružen je osvrt na metaheuristički pristup rešavanja navedenog problema, a zatim je predložena modifikacija funkcije troškova zagušenja u okviru samog modela. U četvrtom poglavlju predstavljen je numerički primer sa komparativnim rezultatima primene, sa i bez modifikacije funkcije troškova zagušenja, nakon čega su data zaključna razmatranja.

2. Funkcija troškova zagušenja

Problem proširenja kapaciteta mreže predstavlja klasu problema koji se odnose na optimizaciju mrežnih resursa, odnosno na određivanje optimalnog perioda proširenja saobraćajnih kapaciteta. U literaturi koja se odnosi na navedenu klasu problema, mogu se pronaći pristupi koji se, pored teorijskih modela [15], odnose i na različite vidove saobraćaja [16 - 20] uključujući i telekomunikacioni saobraćaj [4], [6], [8], [21], a koji u predstavljenim modelima sadrže i određene oblike funkcije troškova, koji se mogu pojaviti usled zagušenja posmatranih elemenata mreže. Problem zagušenja postojećih resursa mreže ima poseban značaj u procesu planiranja, jer se direktno reflektuje na parametre kvaliteta servisa, odnosno utiče na pojavu nezadovoljstva korisnika. Degradacija kvaliteta servisa može biti uzrok odustajanja od upotrebe servisa i prelazak na alternativno rešenje, što ima za posledicu „odliv“ profita ka konkurentnim operatorima. Zbog toga se gubitak profita može matematički predstaviti na različite načine, kao trošak, zavisno od vrste posmatranog problema.

U optimizacionim modelima, generalno, troškovi zagušenja saobraćaja matematički se predstavljaju u obliku funkcije koju treba minimizirati. U opštem slučaju,

ova funkcija se predstavlja kao nivo „penala“ (nivo troškova) kojim se posmatrani resurs „kažnjava“ u slučaju pojave zagušenja, zbog čega, ova funkcija često nosi i naziv *penalty function*. Mehanizam „kažnjavanja“ je takav da, što je veći jedinični nivo opterećenja posmatranog resursa – to je veći priraštaj nivoa troškova po jedinici opterećenja i obrnuto. U literaturi postoje različiti načini na koje se ovaj mehanizam može opisati u matematičkom obliku. U opštem slučaju [22], funkciju troškova zagušenja najpogodnije je opisati kao konveksnu, neprekidnu i neopadajuću funkciju $f_l(x_l)$ sa promenljivom x_l koja predstavlja intenzitet saobraćaja u času glavnog opterećenja, na resursu l , odnosno

$$f_l(x_l) = \sum_i \frac{x_l}{c_l - x_l}, \quad x_l \leq c_l, i \in l, \forall l \in L, \quad (1)$$

gde je c_l – kapacitet posmatranog resursa l , koji pripada skupu svih resursa na posmatranoj mreži L . Predstavljeni oblik funkcije troškova zagušenja pruža mogućnost formiranja optimalnog saobraćajnog plana, sa kojim bi dati obim saobraćaja bio ravnomerno raspoređen po posmatranim resursima.

U literaturi koja se odnosi na telekomunikacioni saobraćaj, odnosno različite probleme raspodele saobraćaja, funkcija troškova zagušenja figuriše u širokom spektru modela, poput [14], [9] gde se ispituje problem optimizacije mrežnog rutiranja (u slučaju OSPF ruting protokola), sa komparativnom analizom vezanom za primenu MPLS tehnologije. Funkcija troškova, sa oblikom bliskim (1), prikazana je kod primene teorije igara u analizi odnosa energetske efikasnosti i upotrebe *load balancing* koncepta, u slučaju primene MPLS tehnologije [22]. Pored toga, *Fortz&Thorup*-ova funkcija troškova zagušenja je iskorišćena i za probleme proširenja kapaciteta resursa magistralnih mreža za internet saobraćaj [2 - 5], [10]. Treba naglasiti da su delovi istraživanja, čiji su rezultati predstavljeni u [13], [23], bili inspirisani upravo upotrebom ove funkcije u problemima predstavljenim u [6]. Rezultati nastavka navedenog istraživanja, pokazali su na mogućnosti primene ove funkcije i u slučaju metaheurističkog pristupa rešavanju problema proširenja mrežnih kapaciteta, kroz upotrebu modifikovanog oblika ove funkcije, što će biti prikazano u narednim poglavljima. Funkcija troškova zagušenja, predstavljena od strane *Bernard Fortz*-a i *Mikkel Thorup*-a [14], u modelu kojim se rešava problem optimizacije rutiranja u slučaju upotrebe OSPF ruting protokola. Vrednost ove funkcije $\phi(u_l)$ zavisi od stepena opterećenja linka u_l i to na sledeći način:

$$\phi(u_l) = \begin{cases} 1 & \text{za } 0 \leq u_l < 1/3 \\ 3 & \text{za } 1/3 \leq u_l < 2/3 \\ 10 & \text{za } 2/3 \leq u_l < 9/10 \\ 70 & \text{za } 9/10 \leq u_l < 1 \\ 500 & \text{za } 1 \leq u_l < 11/10 \\ 5000 & \text{za } 11/10 \leq u_l < \infty \end{cases} \quad (2)$$

Funkcija troškova zagušenja je koncipirana tako da se unapred utvrđenim vrednostima *cost* parametara linkova, koji pripadaju visoko opterećenim rutama, pridružuju dodatne vrednosti troškova, sa ciljem da se posmatrani obim saobraćaja preusmeri (rerutira) ka manje opterećenim rutama, odnosno linkovima koji imaju niže vrednosti *cost* parametra. Rezultat dobijen primenom ovog modela bio je blizak optimalnom rešenju, koje podrazumeva optimalnu opterećenost svih pripadajućih linkova na posmatranoj mreži. Problem optimizacije rutiranja u slučaju upotrebe OSPF protokola, uz upotrebu ove funkcije, rešavali su *Ericsson*, *Resende* i *Pardalos* [9], upotrebom

genetskog algoritma. Navedenu funkciju koristio je i *Oliver Heckmann*, u modelima za izbor optimalne strategije proširenja kapaciteta, predstavljenim u [6]. Nabrojani modeli, pored razlika u samoj prirodi problema koji su rešavani, razlikuju se i po ulozi funkcije troškova zagušenja. Naime, *Fortz* i *Thorup* su stavili akcenat na upotrebu navedene funkcije kao oblika ograničenja, zadržavajući početne postavke funkcije cilja, a sa primarnim ciljem da, pomoću karakteristike funkcije (skup rastućih linearnih funkcija i konveksnom karakteristikom funkcije, duž celog intervala), realizuju izvršenje korespondentne heuristike u polinomijalnom vremenu. Nasuprot tome, *Heckmann*, u svojim modelima, navedenu funkciju postavlja kao deo funkcije cilja, integrišući je sa troškovima opreme, uz zadržavanje osnovnih karakteristika funkcije (linearni delovi funkcije i konveksnost), ali isključujući mogućnost formiranja rešenja kroz upotrebu heuristike.

3. Modifikacija *Fortz&Thorup*-ove funkcije troškova zagušenja

Jedna od najvažnijih karakteristika *Fortz&Thorup*-ove funkcije troškova zagušenja je mogućnost dodeljivanja penala za nivo ulaznih opterećenja većih od 100% ($u_i \geq 1$), što čini ovu funkciju pogodnom za upotrebu u modelima zasnovanim na metaheurističkom pristupu rešavanja problema proširenja mrežnih kapaciteta. Naime, modeli koji pripadaju klasi stohastičkih populacionih metaheuristika, podrazumevaju generisanje određenog broja (skupa) slučajnih rešenja, koji pripadaju tzv. *prostoru rešenja* (solution space). Primenom algoritma zasnovanog na setu operacija kojima se oponašaju određeni prirodni procesi, ili sistemi, vrši se pretraga i evaluacija datih rešenja. Na osnovu dobijenih rezultata sintetizuje se skup nove generacije rešenja (sa poboljšanim karakteristikama), koji se nadalje, iterativnim metodama, ponovo uvodi u proces, radi dalje selekcije i evaluacije. Nakon određenog broja iteracija, evolutivni proces dovodi do generisanja rešenja koje je identično, ili približno jednako, optimalnom rešenju. Kao što je već navedeno, rešenje problema proširenja kapaciteta na posmatranoj mreži predstavlja skup optimalnih planova proširenja kapaciteta svakog elementa mreže pojedinačno, pri čemu element mreže može biti čvor (npr. sve komponente jednog telekomunikacionog čvorišta, čija uloga i pripadajuće karakteristike mogu imati uticaj na informacionu propusnost mreže), grana (npr. jedan ili više linkova između dva posmatrana čvorišta), ili odgovarajuća grupacija mrežnih komponenti, koje mogu činiti jednu tehničku ili logičku celinu. Na primer, u slučaju DWDM mreža, uopšteno posmatrano, kao element mreže može se posmatrati i jedan DWDM optički link, sa njemu pripadajućim multiplekserima, u daljem tekstu Multiplekser-Link (ML element). Upravo ovakav ML element će biti upotrebljen kao primer, koji će se analizirati u opisu metaheurističkog pristupa rešenju navedenih problema. Naime, proširenje kapaciteta jednog ML elementa može se realizovati kroz aktiviranje jedne ili više talasnih dužina duž DWDM optičkog linka. Broj talasnih dužina koji može biti aktiviran zavisi od kapaciteta multipleksera (izraženog u broju talasnih dužina, obično sa parnim množiocem, npr. 4, 8, 16, 32 talasne dužine), sa kojim je link terminiran (na obe strane). Ukoliko su na postojećem multipleksersu sve talasne dužine već aktivirane, proširenje kapaciteta se vrši zamenom postojećeg multipleksera novim, koji ima kapacitet većeg broja talasnih dužina od prethodnog. Troškovi proširenja kapaciteta, u ovom slučaju, odnose se na troškove aktivacije jedne talasne dužine, kao i nabavku novog para multipleksera. Troškovi nabavke multipleksera figurišu u rešavanju problema proširenja kapaciteta na osnovu dva kriterijuma. Prvi

kriterijum se odnosi na pad cene multipleksera tokom vremena. Drugim rečima, odlaganjem nabavke možemo postići uštedu, pod uslovom da u periodu odlaganja neće biti pojave zagušenja posmatranog linka, a samim tim i gubitka profita usled odlaska klijenata zbog nezadovoljstva. Drugi kriterijum se odnosi na izbor kapaciteta novog multipleksera. Ako posmatramo ukupan period planiranja, ne znači da se najveći stepen ušteda može ostvariti inkrementalnom nabavkom novih multipleksera, koji imaju dvostruko veći kapacitet. Shodno navedenom, pod planom proširenja kapaciteta jednog ML elementa, podrazumeva se vremenski raspored aktiviranja talasnih dužina, kao i nabavki novih multipleksera, sa ciljem da se, u posmatranom vremenskom periodu planiranja, ostvari najveći nivo mogućih ušteda (odnosno, najmanji nivo mogućih troškova) i da posmatrani ML element funkcioniše bez pojave zagušenja. Navedeni problem se može formulirati kao problem celobrojnog mešovitog programiranja, što je, na početku ovog istraživanja, prikazano u [23]. Metaheuristički pristup podrazumeva da se navedeni plan proširenja konvertuje u odgovarajući logički oblik, pogodan za procesiranje upotrebom jednog od raspoloživih algoritama, pogodnog za rešavanje navedenog problema. Logička reprezentacija plana proširenja mora imati formu koja ispunjava uslov da se mogu generisati sve kombinacije vremenskog rasporeda, koje bi u tom slučaju činile skup mogućih rešenja (tj. prostor rešenja).

U ovom radu, metaheuristički pristup je realizovan kroz upotrebu genetskog algoritma. Za osnovni element, koji figuriše u prostoru rešenja, uzima se hromozom čija struktura može biti formirana na različite načine. Postupak logičke reprezentacije u slučaju genetskih algoritama naziva se *kodiranje hromozoma* i biće predstavljen kroz naredne primere. U prvom primeru, može se formirati logička reprezentacija u kojoj jedan gen u hromozomu može predstavljati broj aktivnih talasnih dužina u posmatranoj jedinici vremena. U drugom primeru jedan gen može činiti broj, koja označava da li je u posmatranom vremenu bilo promene u broju talasnih dužina u odnosu na prethodni period, kao i kolika je ta promena, ako je do nje došlo (tj. 0 – nema promene, ili 1, 2, 3...- ima promene i za koliko). Generalno, kodiranje mora bit realizovano na takav način da pruža mogućnost efikasne evaluacije posmatranog hromozoma kroz definisanje tzv. *fitness* funkcije. Ova funkcija se dovodi u direktnu vezu sa funkcijom cilja. Na primer, ukoliko se funkcija cilja minimizira (da bi se dostigao minimum troškova), tada njena *fitness* funkcija, kao obrnuto proporcionalna vrednost, teži ka maksimumu. To znači da će vrednost *fitness* funkcije, u slučaju evaluacije hromozoma koji u sebi nosi rešenje blisko optimalnom (tzv. dobrog hromozoma), biti veća u poređenju sa slučajem hromozoma sa lošijim rešenjem (tzv. lošeg hromozoma). Skup potencijalnih rešenja formira tzv. populaciju hromozoma, koja se nadalje propušta kroz proces koji oponaša prirodno razmnožavanje. Naime, populacija, koja se sastoji od grupe hromozoma, formirane na slučajan način, prepušta se procesima selekcije, ukrštanja i mutacije. Ispitivanjem kvaliteta hromozoma (izračunavanjem vrednosti *fitness* funkcije) vrši se selekcija najboljih hromozoma, od kojih nastaju parovi *roditelja*. Nad populacijom roditelja se, nadalje, vrši proces ukrštanja, koji podrazumeva formiranje *potomstva*, kroz postupak razmene delova hromozoma između roditelja. Procesima selekcije i ukrštanja kroz veći broj iteracija formiraju se populacije potomstva, čije karakteristike hromozoma su takve da ne mogu dostići globalni minimum funkcije cilja, bez obzira na kvalitet genetskog materijala (kvalitet hromozoma). Da bi se izbegla konvergencija ka lokalnom minimumu funkcije cilja, nad svakom generacijom potomaka primenjuje se i proces *mutacije*, koji podrazumeva izmenu vrednosti nekog gena po slučajnom principu, ukoliko

se nad određenim hromozomom realizuje odluka o mutaciji na osnovu vrednosti verovatnoće (stepena) mutacije. Nakon procesa selekcije, ukrštanja i mutacije, dobijena populacija potomstva (tzv. *generacija*), ponovo se podvrgava istim procesima, sa ciljem dobijanja nove generacije. Ovako formulisan iterativni proces genetskog algoritma rezultuje formiranjem populacije hromozoma, u kojoj najbolji hromozom sadrži informaciju o rešenju, koje je jednako, ili dovoljno blisko, optimalnom rešenju posmatranog problema. Algoritam se može okončati, ili dostizanjem unapred definisanog broja generacija, ili pozitivnim ishodom testa detekcije konvergencije ka globalnom minimumu. Ceo proces koji vodi do ovakvog rešenja može se ubrzati primenom principa *elitizma*, koji podrazumeva da se u jednoj iteraciji najbolji hromozom „kopira“ u sledeći generaciju. Time se postiže brža konvergencija ka optimalnom rešenju, odnosno skraćuje se ukupno vreme proračuna. Na brzinu konvergencije ka optimalnom rešenju (globalnom minimumu) može uticati veći broj različitih faktora, od kojih su najvažniji stepen mutacije, broj hromozoma u populaciji, broj i struktura gena koje čine jedan hromozom, zatim broj generacija, ali i način izračunavanja *fitness* funkcije. U slučaju kada je kodiranje hromozoma takvo da ceo hromozom u sebi sadrži kompletan kodirani plan proširenja jednog ML elementa, evaluacija jednog takvog hromozoma mora imati mogućnost odgovarajućeg ocenjivanja svakog pojedinačnog gena, koji u sebi nosi informaciju da li je došlo do proširenja kapaciteta, a ako jeste, kada i za koliko. U delu istraživanja, čiji su rezultati predstavljeni u ovom radu, analizirana je preciznost evaluacije jednog hromozoma kodiranog na navedeni način, na nivou jednog gena.

Kao što je već navedeno, u postupak evaluacije uključena je i *Fortz&Thorup*-ova funkcija troškova zagušenja i za to postoje dva razloga: prvi razlog je implementacija modela [23] i, dodatno, ova funkcija ima osobinu dodeljivanja „penala“ za opterećenja veća od 100%. Ova osobina je posebno važna, zbog evaluacije hromozoma, koji u sebi sadrže gene sa informacijom o broju talasnih dužina koje bi, sa prognoziranim obimom saobraćaja u posmatranom vremenu, bili pod nivoom iskorišćenosti $u_i \geq 1$. To znači da bi se vrednost *fitness* funkcije posmatranog gena drastično smanjila, kandidujući korespondentne hromozome kao „loše“ i smanjila im verovatnoću selekcije za narednu generaciju. Ipak, karakteristika linearnosti ove funkcije pokazala je da postoji potreba za njenim unapređenjem, posebno u slučaju evaluacije gena čije dekodirane vrednosti daju iskorišćenja na linku u intervalu od 90 do 100%. Naime, iskorišćenosti bliže vrednosti od 90% su mnogo pogodnije u konačnom rešenju, u poređenju sa iskorišćenosti resursa bliskim nivou vrednosti od 100%. Međutim, upravo karakteristika linearnosti na ovom intervalu rezultira pojavom ravnomernog „kažnjavanja“ gena u hromozomu, bez obzira na navedeni nivo iskorišćenja. Efekat „ravnomernog kažnjavanja“ je postao osnovni motiv za modifikaciju *Fortz&Thorup*-ove funkcije troškova zagušenja. Predložena modifikacija funkcije sadrži dva neprekidna konveksna segmenta u sledećem obliku:

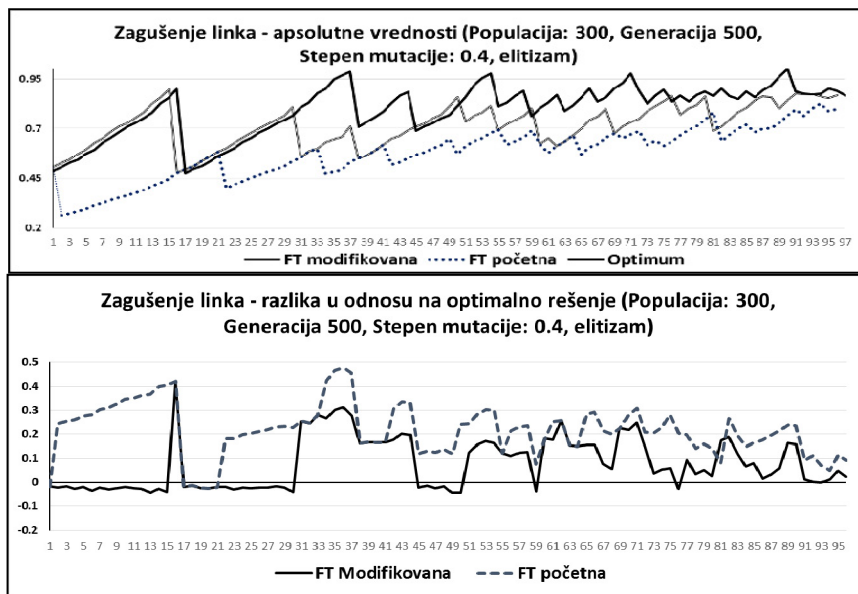
$$\phi(u_i) = \begin{cases} 0.15 \cdot u_i - 0.15, & 0 < u_i \leq 0.05 \\ 0.2109 \cdot e^{0.2176 \cdot u_i}, & 0.05 < u_i \leq 0.9 \\ 39.643 \cdot u_i^2 - 115.36 \cdot u_i + 91, & 0.9 < u_i \leq 1.1 \\ 4500 \cdot u_i - 4000, & u_i > 1.1 \end{cases} \quad (3)$$

Stepen korelacije navedenih segmenata, u odnosu na originalni oblik funkcije, iznose 1, 0.9896, 0.9968 i 1, respektivno. „Kažnjavanje“ hromozoma za gene sa informacijom korespondentnom za opterećenja ispod 5%, kao i iznad 110%, zadržala su linearni oblik,

s tim da su intervali i parametri prilagođeni karakteristikama modifikovane funkcije troškova zagušenja, u cilju zadržavanja njenih osnovnih karakteristika.

4. Numerički primer

U numeričkom primeru analizirana je mogućnost proširenja kapaciteta jednog optičkog DWDM linka, sa pripadajućim multiplekserima. Za rešavanje ovog problema metaheurističkim pristupom odabran je genetski algoritam. Za ulazne podatke upotrebljen je prognozirani obim saobraćaja, predstavljen u [13], za period prognoziranja sačinjen od 96 trenutaka odluke o proširenju kapaciteta.



Slika 1. Rezultati primene genetskog algoritma u slučaju primene početne i modifikovane funkcije troškova zagušenja

Struktura jednog hromozoma, podeljena je na tri zone: prva zona nosi informaciju o tipu multipleksa u nultom (početnom) i poslednjem vremenskom intervalu, kao i broj aktivnih talasnih dužina na početku perioda prognoziranja (u nultom periodu). S obzirom da je usvojena vrednost kapaciteta jedne talasne dužina 40Gb/s, za tip multipleksa u poslednjem vremenskom intervalu, usvojena je vrednost prvog množioca navedenog kapaciteta, koja je veća od vrednosti prognoziranog obima saobraćaja za posmatrano vreme. Na ovaj način smanjen je broj hromozoma koji, u toku izvršavanja genetskog algoritma, ne bi prošli selekciju za potomstvo. Drugu zonu čini prostor u kome se smešta informacija o redosledu tipova multipleksa, koji su nabavljeni tokom celog perioda planiranja. Konačno, treća zona hromozoma nosi binarne zapise gena, koji u sebi nose informaciju da li je bilo promene broja aktivnih talasnih dužina i, ako jeste, koliki je to broj. S obzirom da prva zona sadrži bazične informacije, ona nije podložna postupcima selekcije, ukrštanja i mutacije, dok se kombinacija redosleda multipleksa u drugoj zoni menja hibridno, upotrebom slučajnih veličina, uz poštovanje redosleda tipova aktivnih

multipleksera (na primer, nije dozvoljeno da multiplekser „naslednik“ bude manjeg, ili jednakog kapaciteta od „prethodnika“, kao ni većeg od onog kome može pripasti broj aktivnih talasnih dužina u 96-tom trenutku odluke o proširenju kapaciteta). Komparativni rezultati primene genetskog algoritma, uz primenu početnog i modifikovanog oblika funkcije troškova zagušenja, mogu se videti na slici 1. Rezultat primene genetskog algoritma, u slučajevima sa i bez modifikacije, pokazao je sličnu brzinu konvergencije ka optimalnom rešenju.

Kao strožiji kriterijum u eksperimentu, usvojen je mali broj članova populacije (u odnosu na veličinu hromozoma), kao i ograničen broj generacija (500) do završetka izvršavanja algoritma. Sa navedenim parametrima i pri niskom stepenu mutacije 0.01, populacija je težila ka lokalnom minimumu, a takva konvergencija se mogla uočiti već posle 50 generacija. Sa povećanjem stepena mutacije, u oba slučaja pojavila se konvergencija ka globalnom rešenju (uočena nakon formiranja 350-te generacije). Po završetku izvršavanja zadatog algoritma, dobijeno je rešenje, koje je dovoljno blisko optimalnom, da se može usvojiti kao zadovoljavajuće rešenje.

5. Zaključak

U ovom radu primenjen je metaheuristički pristup za rešavanje problema proširenja mrežnih kapaciteta, kroz upotrebu genetskog algoritma. Predstavljena je nova modifikacija *Fortz&Thorup*-ove funkcija zagušenja troškova. Namena ove modifikacije je da se, u slučaju primene stohastičkih populacionih metaheuristika u rešavanju problema proširenja mrežnih kapaciteta, poveća osetljivost na detekciju rešenja koja mogu dovesti do zagušenja linka, ili ML elementa, u prognoziranom periodu. Modifikacija ove funkcije odnosi se na zamenu linearnih segmenata funkcije sa konveksnim, čime se rešenja sa većim nivoom iskorišćenosti na linku (iznad 90%) dodatno opterećuju troškovima zagušenja, i na taj način se u procesima selekcije rešenja ostavlja prostor za rešenja bliska optimalnom. Kroz numerički primer dati su komparativni rezultati primene genetskog algoritma, uz primenu početnog i modifikovanog oblika funkcije troškova zagušenja. Rezultat primene genetskog algoritma, u slučajevima sa i bez modifikacije, pokazao je približno istu brzinu konvergencije ka optimalnom rešenju.

Zahvalnica

Ovaj rad je delimično finansiran od strane Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije, u okviru projekata TR36012 i TR32025.

Literatura

- [1] A. M. Odlyzko, "Internet traffic growth: Sources and implications," in *ITCom 2003*, 2003.
- [2] R. Kouassi, M. Gendreau, J.-Y. Potvin and P. Soriano, "Heuristics for multi-period capacity expansion in local telecommunications networks," *Journal of Heuristics*, vol. 15, no. 4, pp. 381-402, 2009.
- [3] B. Melián, M. Laguna and J. A. Moreno-Pérez, "Capacity expansion of fiber optic networks with WDM systems: Problem formulation and comparative analysis,"

- Computers & Operations Research*, vol. 31, no. 3, pp. 461-472, 2004.
- [4] M. Riis and K. A. Andersen, "Multiperiod capacity expansion of a telecommunications connection with uncertain demand," *Computers & Operations Research*, vol. 31, no. 9, pp. 1427-1436, 2004.
- [5] Y. d'Halluin, P. A. Forsyth and K. R. Vetzal, "Managing capacity for telecommunications networks under uncertainty," *IEEE/ACM Transactions on Networking (TON)*, vol. 10, no. 4, pp. 579-587, 2002.
- [6] O. M. Heckmann, *The Competitive Internet Service Provider: Network Architecture, Interconnection, Traffic Engineering and Network Design*, John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [7] M. Gendreau, J.-Y. Potvin, A. Smires and P. Soriano, "Multi-period capacity expansion for a local access telecommunications network," *European Journal of Operational Research*, vol. 172, no. 3, pp. 1051-1066, 2006.
- [8] E. Palkopoulou, C. Merkle, D. A. Schupke, C. G. Gruber and A. Kirstädter, "Traffic models for future backbone networks - a service-oriented approach," *European Transactions on Telecommunications*, vol. 22, no. 4, pp. 137-150, 2011.
- [9] M. Ericsson, M. G. C. Resende and P. M. Pardalos, "A genetic algorithm for the weight setting problem in OSPF routing," *Journal of combinatorial optimization*, vol. 6, no. 3, pp. 299-333, 2002.
- [10] A. Girard, B. Sansó and F. Vazquez-Abad, *Performance evaluation and planning methods for the next generation internet*, vol. 6, Springer Science & Business Media, 2006.
- [11] P.-H. Ho, H. T. Mouftah and J. Wu, "A scalable design of multigranularity optical cross-connects for the next-generation optical internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 21, no. 7, pp. 1133-1142, 2003.
- [12] M. Pióro and D. Medhi, *Routing, flow, and capacity design in communication and computer networks*, Elsevier, 2004.
- [13] S. Mitrović, V. Radojičić and G. Marković, "Analiza plana proširenja kapaciteta optičkog linka u funkciji troškova opreme," in *PosTel 2014 - XXXII simpozijum o novim tehnologijama u Poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Beograd, 2014.
- [14] B. Fortz and M. Thorup, "Internet traffic engineering by optimizing OSPF weights," in *INFOCOM 2000. Nineteenth annual joint conference of the IEEE computer and communications societies. Proceedings. IEEE*, 2000.
- [15] Z. Gao, J. Wu and H. Sun, "Solution algorithm for the bi-level discrete network design problem," *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 39, no. 6, pp. 479-495, 2005.
- [16] J. De Cea and E. Fernández, "Transit assignment for congested public transport systems: an equilibrium model," *Transportation science*, vol. 27, no. 2, pp. 133-147, 1993.
- [17] Y.-H. Jiang, L. Wang and Y.-H. Jin, "Bottleneck analysis for network flow model," *Advances in Engineering Software*, vol. 34, no. 10, pp. 641-651, 2003.
- [18] G. d. Miranda Junior, R. S. d. Camargo, L. R. Pinto, S. V. Conceição and R. P. M.

- Ferreira, "Hub location under hub congestion and demand uncertainty: the Brazilian case study," *Pesquisa Operacional*, vol. 31, no. 2, pp. 319-349, 2011.
- [19] W. Szeto, Y. Jiang, K. Wong and M. Solayappan, "Reliability-based stochastic transit assignment with capacity constraints: Formulation and solution method," *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, vol. 35, pp. 286-304, 2013.
- [20] J. H. Wu, M. Florian and P. Marcotte, "Transit equilibrium assignment: a model and solution algorithms," *Transportation Science*, vol. 28, no. 3, pp. 193-203, 1994.
- [21] S. Shakkottai and R. Srikant, "Mean FDE models for Internet congestion control under a many-flows regime," *Information Theory, IEEE Transactions on*, vol. 50, no. 6, pp. 1050-1072, 2004.
- [22] Y. Zhao, S. Wang, S. Xu, X. Wang, X. Gao and C. Qiao, "Load balance vs energy efficiency in traffic engineering: A game theoretical perspective," in *INFOCOM, 2013 Proceedings IEEE*, 2013.
- [23] S. Mitrović, V. Radojičić and G. Marković, "Strategije za proširenje resursa mreže u funkciji modela tražnje," in *XXXI Simpozijum o novi tehnologijama u poštanskom i telekomunikacionom saobraćaju*, Beograd, 2013.

Abstract: *This paper presents a suitable modification of the congestion cost function, which has an important role in choosing the optimal strategy for the network resources expansion, at a precisely defined point of time and for the pre-defined level of resource utilization. This type of tool is suitable for metaheuristic approach to solving the problems of network resources capacity expansion, which is shown in the numerical example, for the case of a DWDM link. We analyzed the results obtained in the case of solving this problem, with or without modification cost function.*

Keywords: *congestion cost function, metaheuristic approach, network resources capacity expansion*

**THE MODIFICATION OF THE CONGESTION
COST FUNCTION IN NETWORK CAPACITY EXPANSION
PROBLEMS BY METAHEURISTIC APPROACH**

Slobodan Mitrović, Valentina Radojičić, Miodrag Bakmaz