

## PLANIRANJE RAZVOJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA KORIŠĆENJEM HIBRIDNOG ALGORITMA SIMULIRANOG KALJENJA

Ž. N. POPOVIĆ, PD Elektrovojvodina, Srbija

V. Đ. KERLETA, Tehnički fakultet „Mihailo Pupin“, Srbija

### UVOD

Planiranje razvoja distributivnih mreža je težak kombinatorni optimizacioni problem čije rešavanja se razmatra i unapređuje već dugi niz godina [1],[2]. Za rešavanje ovako složenog problema su predložene dve osnovne grupe metoda: metode zasnovane na veštačkoj inteligenciji odnosno metode koje oponašaju neke fenomene iz prirode poznate pod zajedničkim nazivom metaheurističke metode, i metode zasnovane na matematičkoj optimizaciji.

Predložene metaheurističke metode [3]-[6], najčešće zasnovane na genetskim algoritmima, simuliranom kaljenju, tabu pretraživanju i mravljim algoritmima, mogu naći rešenje za probleme planiranja distributivnih mreža realnih (velikih) dimenzija u prihvatljivom vremenu. Međutim, predloženi pristupi ne mogu garantovati dobijanje globalnog optimalnog rešenja a kvalitet dobijenih rešenja je neizvestan. Matematički optimizacioni modeli najčešće koriste algoritme mešovitog celobrojnog linearnog programiranja (MILP) [7]-[9]. Iako ovi modeli mogu garantovati dobijanje globalnog optimalnog rešenja, zbog izuzetno velike računarske kompleksnosti oni su ograničeni na rešavanje probleme manjih dimenzija.

U ovome radu je predložen novi hibridni metaheuristički algoritam za rešavanje statičkih (jedno-etapnih) problema planiranja razvoja distributivnih mreža realnih dimenzija zasnovan na algoritmu simuliranog kaljenja (SA), MILP algoritmu, konceptu lokalnih mreža i tehnici izmene grana. Cilj ovoga pristupa je da se kombinovanjem prednosti metaheurističkih metoda i matematičke optimizacije unapredi efektivnost i efikasnost do sada predloženih metoda za rešavanje statičkih problema planiranja velikih dimenzija. Time bi se unapredio i kvalitet modela za rešavanje više-etapnih problema planiranja velikih dimenzija, koji su u najvećoj meri zasnovani na dekompozicionim algoritmima i zbog toga bitno zavise od kvaliteta korišćenih statičkih algoritama [10].

U prvom koraku predloženog algoritma se određuje inicijalno (početno) rešenje deljenjem razmatrane distributivne mreže na više podmreža (lokalnih mreža) i rešavanjem problema planiranja u svakoj lokalnoj mreži korišćenjem MILP algoritma. Inicijalno rešenje se zatim dalje iterativno modifikuje u traženju optimalnog rešenja korišćenjem tehnike simuliranog kaljenja. U svakoj iteraciji se na slučaj generišu susedna (bliska) rešenja. Bliske (susedne) strukture se generišu modifikovanjem na slučajan način lokalnih mreža koje postoje u inicijalnom rešenju korišćenjem tehnike izmene grana kao i kreiranjem na slučajan način novih lokalnih mreža, odnosno podelom razmatrane mreže na više novih lokalnih mreža. Na prvi od opisanih načina se vrši eksploatacija tekućeg rešenja (korak intenzifikacije) dok je na drugi način omogućeno istraživanje do tada ne istraženih delova u dopustivom prostoru. Jedno blisko rešenje se dobija primenjivanjem odgovarajućeg MILP algoritam u svakoj lokalnoj mreži modifikovanoj (kreiranoj) u toku faze itezifikacije (diverzifikacije). Treba naglasiti da pravilna implementacija prethodno opisanih mehanizama pretraživanja, a naročito drugoga, može značajno da unapredi efektivnost algoritma simuliranog kaljenja, odnosno da unapredi kvalitet dobijenih rešenja

[11]. Bliska rešenja koja unapređuju objektivnu funkciju (troškove) se uvek prihvataju dok se rešenja koja ne unapređuju objektivnu funkciju prihvataju sa određenom verovatnoćom. Opisani proces se ponavlja sve dok se ne zadovolji kriterijum zaustavljanja i nađe najbolje rešenje.

Dobijeni numerički rezultati pokazuju da predloženi pristup može dati ista rešenja kao i modeli bazirani na mešovitom celobrojnem linearnom programiranju i prema tome ima potencijal da bitno unapredi proces planiranja razvoja distributivnih mreža realnih (velikih) dimenzija.

## HIBRIDNI ALGORITAM SIMULIRANOG KALJENJA

Algoritam simuliranog kaljenja za rešavanje problema planiranja razvoja distributivnih mreža se može predstaviti na sledeći način:

**Input:** Šema hlađenja /\*Početna temperatura ( $T_{max}$ ), Krajnja temperatura ( $T_{min}$ ), Stopa hlađenja, Broj iteracija na fiksnoj temperaturi\*/.

$s = s_0$ ; / Generisanje početnog rešenja /

$T_k = T_{max}$ ; /\* Početna temperatura\* /

$k=0$ ;

**Repeat** /\*Globalna iteracija,  $k$ \*/

**Repeat** /\*Na fiksnoj temperaturi  $T_k$  (u iteraciji  $k$ )\* /

Generisati na slučaj susedno rešenje  $s'$ ;

$\Delta E = f(s') - f(s)$ ; /\*Razlika troška\*/

**If**  $E \leq 0$  **Then**  $s = s'$ ; /\*Prihvati  $s'$  kao tekuće rešenje\*/

**If**  $f(s') - f(s_{best}) < 0$  **Then**  $s_{best} = s'$ ; /\*Prihvati  $s'$  kao najbolje rešenje pronađeno do sada ( $s_{best}$ )\* /

**Else** Prihvati  $s'$  sa verovatnoćom  $e^{-\Delta E/T_k}$ ;

**Until** Ravnotežni uslov / \*npr. zadati broj iteracija izvršen na svakoj temperaturi  $T_k$  \*/

$T_{k+1} = g(T_k)$ ; /\* Stopa hlađenja\*/

$k=k+1$ ;

**Until** Kriterijum zaustavljanja zadovoljen /\* npr.  $T_k < T_{min}$  \*/

**Output:** Najbolje rešenje nađeno.

Elementi predloženog algoritma su detaljno obrađeni u nastavku.

### Šema hlađenja

Šema hlađenja je kontrolna strategija koja se koristi od početka pa do konvergencije algoritma simuliranog kaljenja. Parametri koji se razmatraju pri definisanju šeme hlađenja su početna temperatura, ravnotežno stanje (broj iteracija na svakoj temperaturi), stopa hlađenja (stopa smanjenja temperature) i krajnja temperatura koja definiše kriterijum zaustavljanja. U ovome radu se početna temperatura određuje na sledeći način [12]:

$$T_{max} = \frac{\mu}{-\ln \phi} \cdot f(x^0) \quad (1)$$

gde se  $\phi$  [%] susednih rešenja (the uphill moves), koja su  $\mu$  [%] lošija od početnog rešenja  $f(x^0)$ , prihvata na početnoj temperaturi  $T_{max}$ . Određivanje početne temperature  $T_{max}$  na osnovu (1) kao osnovnu prednost ima to što je jednostavno i direktno.

Geometrijska stopa hlađenja se može koristiti kao odgovarajuća funkcija za dobijanje skupa temperatura u šemi hlađenja u problemima planiranja distributivnih mreža [11],[12]. Ova funkcija je definisana na sledeći način:

$$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k \quad (2)$$

gde su  $T_k$  i  $T_{k+1}$  temperature u iteraciji  $k$  i  $k+1$ , respektivno, a  $\alpha$  je konstanta koja generalno leži u opsegu (0.5-0.99) [11].

Broj iteracija koje će biti izvršavane na svakoj temperaturi zavisi od dimenzije problema i definisan je u narednim sekcijama. Algoritam simuliranog kaljenja se zaustavlja kada temperatura dostigne najnižu definisanu vrednost (npr.  $T_{min} = 0.01$ ) ili kada ni jedno novo rešenje nije dobijeno (prihvaćeno) u toku diversifikacionog koraka, što je opisano u nastavku teksta.

## Generisanje početnog rešenja

Inicijalna (početna) distributivna mreža, koju čine sve grane i potrošački čvorovi koji već postoje u razmatranoj mreži kao i sve moguće buduće grane i svi budući čvorovi, se na proizvoljan način deli u više lokalnih mreža (podmreža/podproblema). Svaka lokalna mreža se sastoji od određenog broja susednih fidera. Na primer, lokalnu mrežu čini jedan (izabrani) fider i njegovi prvi susedi, odnosno fideri koji imaju normalno otvorene rasklopne uređaje prema izabranom fideru. Mogući načini određivanja (konstruisanja) lokalnih mreža (podproblema) su detaljno prikazani u [13]. Svaki podproblem se rešava primenom odgovarajućeg modela zasnovanog na mešovitom celobrojnom programiranju, koji je predložen u [14]. Predloženi model je dizajniran tako da minimizira investicioni trošak u distributivnoj mreži uzimajući u obzir naponska i termička ograničenja kao i mogućnost preraspodele opterećenja u mreži. Treba napomenuti da je predloženi MILP model korišćen u cilju verifikacije predloženog pristupa i da se i neki drugi MILP modeli, [8],[9], mogu koristiti za rešavanje generisanih podproblema. Rešavanjem svih podproblema se dobija početno rešenje originalnog problema planiranja. Lokalne mreže koje postoje u početnom rešenju, odnosno koje definišu početno rešenje, se memorišu za daljnju upotrebu kao i skup svih normalno otvorenih rasklopnih uređaja (NOLN) koji povezuju lokalne mreže. Početno rešenje se unapređuje (modifikuje) korak po korak na način opisan u sledećem poglavlju.

## Generisanje susednih rešenja

U dizajniranju struktura susednih tekućoj strukturi (susednih rešenja) dva kontradiktorna kriterijuma se moraju uzeti u obzir: istraživanje dopustivog prostora (diverzifikacija) i eksploatacija najboljeg pronađenog rešenja (intenzifikacija). U procesu intenzifikacije se obećavajući regioni dopustivog prostora, određeni na osnovu dobijenih „dobrih“ rešenja, detaljno istražuju u nadi da će se pronaći bolja rešenja. U procesu diverzifikacije neistraženi regioni dopustivog prostora moraju biti razmatrani da bi se obezbedilo da svi regioni dopustivog prostora budu ravnomerno istraženi i da detaljne pretrage ne budu ograničene na redukovani broj regiona. Treba ponovo naglasiti da je definisanje odgovarajuće strategije pretraživanja (intenzifikacije i diverzifikacije) jedan od najkritičnijih (najvažnijih) elemenata u dizajniranju algoritma simuliranog kaljenja [11].

**Intenzifikacija.** Mehanizam intenzifikacije, predložen u ovome radu, zasnovan je na tehnici izmene grana, [14], konceptu lokalnih mreža i MILP modelu. Izmena grana počinje od početnoga rešenja u iteraciji  $k$  (na temperaturi  $T_k$ ) i susedna struktura se formira na sledeći način. Jedan NOLN rasklopni uređaj se na slučaj bira iz skupa svih NOLN rasklopnih uređaja koji postoje u početnom rešenju u iteraciji  $k$ . Treba imati u vidu da izabrani NOLN rasklopni uređaj povezuje ne samo dve susedne lokalne mreže već i dva susedna fidera koji pripadaju razmatranim lokalnim mrežama. Prema tome, izmena grana će se primenjivati na skup svih rasklopnih uređaja koji pripadaju susednim fiderima. To znači da će slučajno izabrani NOLN rasklopni uređaj biti zatvoren a njemu susedni rasklopni uređaj će biti otvoren tako da uslov radikalnosti u mreži bude zadovoljen i da svi potrošački čvorovi budu napojeni. Nakon toga se proveravaju naponska i termička ograničenja u razmatranim lokalnim mrežama. Ukoliko ograničenja nisu narušena sledeća izmena grana se primenjuje na isti način i u istom smeru kao i prethodno opisana. Ovaj proces se nastavlja sve dok neko od ograničenja (naponsko ili termičko) ne bude narušeno ili dok sve moguće izmene grana nisu izvršene u izabranom smeru na razmatranim fiderima. Ako je bilo koji od navedenih uslova ispunjen proračuni se vrše u svakoj od razmatranih lokalnih mreža korišćenjem MILP modela. Treba primetiti da se konfiguracija dveju susednih lokalnih mreža promenila tokom procesa izmene grana i na taj način se kreirala nova susedna struktura. MILP model se koristi za rešavanje problema planiranja u svakoj od modifikovanih lokalnih mreža polazeći od inicijalnoga stanja. Grane koje postoje u svakoj od lokalnih mreža, sa preseccima koje su imale u inicijalnoj mreži, definišu inicijalno stanje lokalnih mreža. Na opisani način se dobija novo susedno rešenje celokupnog problema. Ovo rešenje se prihvata ako je njegov trošak ( $f(S_j)$ ) niži od troška tekućeg rešenja ( $f(S_i)$ ). Ukoliko je trošak susednog rešenja veći od troška tekućeg rešenja ono još uvek može biti prihvaćeno sa odeređenom verovatnoćom. Ova mogućnost omogućava algoritmu simuliranog kaljenja da „pobegne“ iz lokalnog optimuma. Celokupni proces prihvatanja nekog rešenja u iteraciji  $k$  (temperaturi  $T_k$ ) se može opisati na sledeći način:

- $\Delta E = f(S_j) - f(S_i)$ ; ako je  $\Delta E > 0$ , tada susedno rešenje postaje tekuće rešenje ( $S_j = S_i$ ); štaviše, ako je trošak susednog rešenja niži od troška do sada najboljeg nađenog rešenja ono postaje tekuće

najbolje rešenje; nove lokalne mreže se memorišu zajedno sa NOLN rasklopnim uređajima koji povezuju te mreže.

- Ako je  $\Delta E < 0$  tada se primenjuje sledeće:
  - Ako je  $e^{-\Delta E/T_k} > \text{random}[0,1]$ , tada susedno rešenje postaje tekuće rešenje; nove lokalne mreže se memorišu zajedno sa NOLN rasklopnim uređajima koji povezuju te mreže.
  - Ako je  $e^{-\Delta E/T_k} < \text{random}[0,1]$ , tada se susedno rešenje ne prihvata.

Opisana intenzifikaciona procedura će se ponoviti za svaki ne procesirani NOLN rasklopni uređaj iz skupa NOLN rasklopnih uređaja koji postoji u početnom rešenju u iteraciji  $k$  (temperaturi  $T_k$ ). Na ovaj način će se izvršiti određen broj iteracija na temperaturi  $T_k$ , odnosno određen broj susednih rešenja koja su bliska početnom rešenju u iteraciji  $k$  će biti generisani. Prema tome, u iteraciji  $k$  novo globalno rešenje problema se može dobiti (prihvatiti). U tom slučaju, novi skup NOLN rasklopnih uređaja između lokalnih mreža je definisan. Ovaj skup odgovara skupu modifikovanih lokalnih mreža koje postoje u rešenju prihvaćenom u iteraciji  $k$ . Na bazi ovoga proces intenzifikacije će biti nastavljen u sledećoj iteraciji ( $k+1$ ). Međutim, ukoliko ni jedno globalno rešenje nije dobijeno (prihvaćeno) na temperaturi  $T_k$  tada se u sledećoj iteraciji ( $k+1$ ) primenjuje proces diverzifikacije.

**Diverzifikacija.** Diverzifikacija je mehanizam kojim se pokušava forisirati pretraga u onim delovima dopustivog prostora koji do tada nisu bili pretraživani. Da bi se omogućila diverzifikacija susedne strukture se formiraju na sledeći način. Polazeći od početnog rešenja (početne konfiguracije mreže) na temperaturi  $T_{k+1}$  susedne strukture se dobijaju konstruisanjem novih lokalnih mreža. U početnoj konfiguraciji mreže na temperaturi  $T_{k+1}$  se na slučaj bira jedan fider i formira se lokalna mreža koja se sastoji od izabranog fidera i njegovih prvih suseda, odnosno fidera koji koji imaju normalno otvorene rasklopne uređaja prema izabranom fideru [13]. Zatim se, koristeći MILP model, rešava problem planiranja za dobijenu lokalnu mrežu polazeći od njenog početnog stanja, odnosno od stanja koje je lokalna mreža imala u početnoj mreži i koje se sastoji od grana koje već postoje u lokalnoj mreži kao i svih budućih grana koje mogu da postoje u njoj. Na ovaj način se generiše jedno susedno rešenje. Prihvatljivost ovoga rešenja se testira na osnovu pravila definisanih u prethodnoj sekciji. Opisana procedura se ponavlja u iteraciji  $k+1$  za svaki od preostalih (do tada ne procesiranih) fidera koji postoje u početnom rešenju na temperaturi  $T_{k+1}$ , odnosno za sve fidere koji nisu deo do tada obrađenih lokalnih mreža. Prema tome, predložena procedura dekomponuje originalni problem (mrežu) u niz lokalnih mreža koje se razlikuju od lokalnih mreža koje definišu početno rešenje na temperaturi  $T_{k+1}$ . Na ovaj način se dobija novo rešenje koje pripada do sada ne istraženim delovi prostora pretraživanja, odnosno omogućena je pretraga u do sada ne istraženim delovima dopustivog prostora. Ovako dobijena rešenja će biti detaljno eksplorisana u narednim iteracijama (koracima) kroz ranije opisani proces intenzifikacije.

## PRIMER PRIMENE

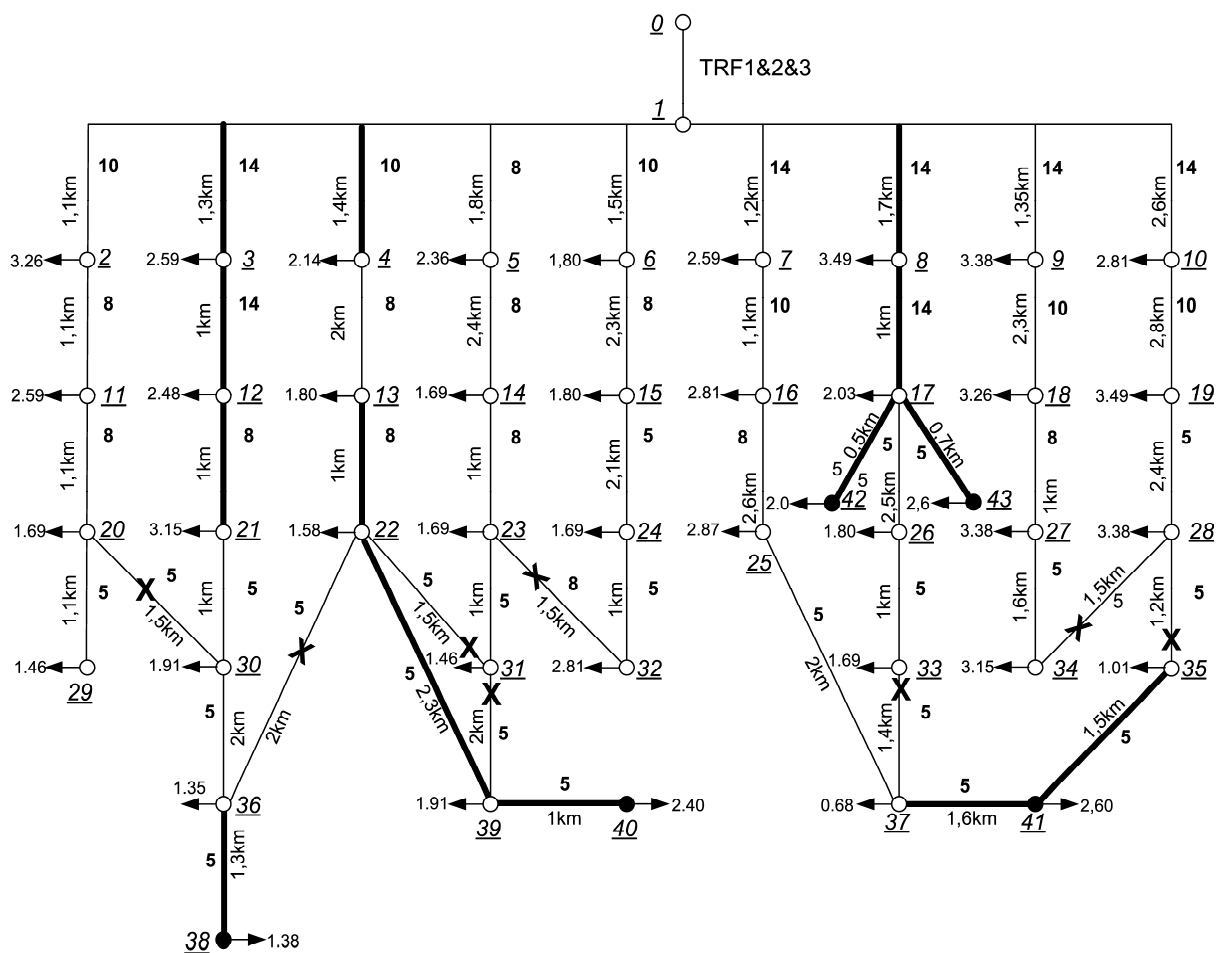
Predloženi pristup je korišćen da bi se našlo rešenje sa minimalnim investicionim troškom za 20 kV mrežu prikazanu na slici 1. Razmatrana mreža se sastoji od jedno napojnog čvora (napojne transformatorske stanice), 44 postojeće grane (pune linije) i 14 mogućih budućih (neizgrađenih) grana (isprekidane linije). U napojnoj stanici postoje tri transformatora 110/20 kV/kV (TRF1&2&3, grana **0-1**) sa kapacitetom od 33 MVA po transformatoru. Svaka grana može da bude izgrađena i/ili pojačana na jednu od četiri veličine. U tabeli 1 su prikazane karakteristike i jedinični troškovi izgradnje za svaki od razmatranih preseka (veličina). Jedinični troškovi pojačanja su dati u tabeli 2. Na slici 1 je termički kapacitet svake postojeće grane u početnom periodu prikazan u MVA (podebljani brojevi) a njihove dužine su date u kilometrima. Predpostavljeno je da se rasklopni uređaj nalazi u svakoj grani. Grane sa normalno otvorenim rasklopnim uređajima, kojima se definiše radijalno uklopno stanje u početnoj mreži, su označene sa "X" na sredini grane. Postojeći potrošački čvorovi (36) su označeni sa praznim kružićima dok je 6 budućih potrošačkih čvorova označeno sa punim kružićima. Prognozirano opterećenje u horizontalnoj godini u svakom potrošačkom čvoru je datu u MVA i prikazano na slici 1. Napon u napojnom čvoru (**1**) je 20,5 kV, minimalni dozvoljeni napon je 19 kV a faktor snage je 0,95. Optimizacioni paket TOMLAB (CPLEX) [15] je korišćen za sve MILP proračune.

Početno rešenje je dobijeno deljenjem mreže sa slike 1 u 3 lokalne mreže (podproblema) tako da se u svakoj lokalnoj mreži nalaze po tri susedna fidera. Problem planiranja u svakoj od dobijenih lokalnih mreža je rešavan primenom odgovarajućeg MILP modela, predloženog u [10], i na taj način je dobijeno početno rešenje originalnog problema. Uzimajući u obzir da je trošak dobijenog rešenja



**TABELA 2 – Troškovi pojačanja**

		Trošak pojačanja [ $\$ \times 10^3/\text{km}$ ]		
Sa \ Na	8	10	14	
	5	72	91	120
8	-	85	105	
10	-	-	90	



**Slika 2. Optimalno rešenje**

## ZAKLJUČAK

U ovome radu je prikazan hibridni algoritam simuliranog kaljenja za rešavanje statičkih problema planiranja razvoja distributivnih mreža realnih dimenzija koji kombinuje prednosti metaheurističke i matematičke optimizacije. Predloženi pristup koristi koncept lokalnih mreža za dekomponovanje originalnog problema (mreže) u niz podproblema (lokalnih mreža) koji se rešavaju korišćenjem MILP modela i na taj način se omogućava dobijanje rešenja za problem planiranja realnih dimenzija. Proces rešavanja je dalje vođen algoritmom simuliranog kaljenja. U svakom koraku algoritma simuliranog kaljenja se generiše više alternativnih (susednih) rešenja ili modifikovanjem tekućih lokalnih mreža korišćenjem tehnike izmene grana (korak intenzifikacije) ili podelom razmatrane mreže u niz novih lokalnih mreža (korak diverzifikacije). Ovo obezbeđuje da se regioni dopustivog prostora pretraživanja koji najviše obećavaju detaljno pretraže i da se nađe najbolje rešenje. Numerički rezultati prikazani u radu pokazuju da predloženi pristup može dati rešenja istog kvaliteta kao i metode matematičke optimizacije (MILP) i da ima potencijal da bude efektivan i efikasan alat za rešavanje problema planiranja razvoja distributivnih mreža realnih dimenzija.

## LITERATURA

1. S.K. Khator, L.C. Leung, 1997, "Power distribution planning: a review of models and issues", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 12, no. 3, 1151-1159.
2. M. Vaziri, K. Tomsovic, T. Gonen, 2000, "Distribution expansion problem revisited - Part I: Categorical analysis and future directions", Proc. Int. Assoc. Science and Technology for Development, Marbella, Spain, 283-290.
3. J. F. Gomez et al., 2004, "Ant colony system algorithm for the planning of primary distribution circuits", IEEE Trans. on Power System., vol. 19, no. 2, 996-1004.
4. E. G. Carrano, L. A. E. Soares, R. H. C. Takahashi, R. R. Saldanah, O. M. Neto, 2006, "Electric distribution network multiobjective design using a problem-specific genetic algorithm", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 21, no. 2, 995-1005.
5. I.J. Ramirez-Rosado, J.A. Dominguez-Navarro, 2006, "New multiobjective tabu search algorithm for fuzzy optimal planning of power distribution systems", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 21, no. 1, 224-233
6. J. Nahman, D. Perić, 2008, "Optimal planning of radial distribution networks by simulated annealing technique", IEEE Trans. on Power Systems, vol. 23, no. 2, 790-795.
7. T. Gonen and B.L. Foote, 1981, "Distribution system Planning Using Mixed Integer Programming", IEE Proc-C, Vol. 133, no. 2, 70-79.
8. M. Vaziri, K. Tomsovic, A. Bose, 2004, "A directed graph formulation of the multistage distribution expansion problem", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 19, no. 3, 1335-1341.
9. S. Haffner, L. F. A. Pereira, L. A. Pereira, L. S. Barreto, 2008, "Multistage model for distribution expansion planning with distributed generation-part I: problem formulation", IEEE Trans. on Power Delivery, vol. 23, no. 2, 915-923.
10. Ž.N. Popović, D.S. Popović, 2010, "Graph theory based formulation of multi-period distribution expansion problems", Electric Power System Research, vol. 80, 1256-1266.
11. El-Ghazali Talibi, 2008, "Metaheuristics – From design to implementation", John Wiley & Sons, USA
12. K.Y. Lee, M.A. El-Sharkawi, 2008, "Modern heuristic optimization techniques – Theory and applications to power systems", John Wiley & Sons, USA.
13. Ž.N. Popović, D. S. Popović, 2003, "A Novel decomposition procedure for distribution network planning", Proceedings of the 38th Universities Power Engineering Conference UPEC 2003.
14. S.K. Goswami, 1997, "Distribution System Planning Using Branch Exchange Technique", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 12, No. 2, 718-723.
15. Available: <http://tomlab.biz/tomlab>

Kontakt informacije autora: *dr Željko Popović, dipl. el. inž., PD Elektrovojvodina, Segedinski put 22-24, 24000 Subotica ; e-mail : zeljko.popovic@su.ev.rs*