

## REKONFIGURACIJA DISTRIBUTIVNIH MREŽA PRIMENOM MATEMATIČKIH I HEURISTIČKIH OPTIMIZACIONIH METODA

## RECONFIGURATION OF DISTRIBUTION NETWORKS USING MATHEMATICAL AND HEURISTIC OPTIMIZATION METHODS

Dario Kanjo, Neven Kovački, *Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad***Oblast – ELEKTROTEHNIKA I RAČUNARSTVO**

**Kratak sadržaj** – Cilj ovog rada jeste da prikaže i upoređi tri različita pristupa za rešavanje problema rekonfiguracije distributivnih mreža, a koji su zasnovani na matematičkim i heurističkim optimizacionim metodama. Najpre je prikazan matematički optimizacioni model za rekonfiguraciju distributivnih mreža zasnovan na mešovito celobrojnom programiranju. Zatim su prikazane metoda izmene grana i metoda simuliranog kaljenja, koje spadaju redom u heurističke i meta-heurističke optimizacione metode za rekonfiguraciju distributivnih mreža. Sve prikazane metode su testirane na primeru realne distributivne mreže, a rezultati su prikazani i komentarisani u radu.

**Ključne reči:** rekonfiguracija distributivne mreže, smanjenje gubitaka aktivne snage, mešovito celobrojno programiranje

**Abstract** – The aim of this paper is to present and compare three approaches to solve the problem of distribution network reconfiguration, which are based on mathematical and heuristic optimization methods. First, this paper presents mathematical optimization model for the distribution network reconfiguration which is based on the mixed integer programming. Then, the paper presents branch exchange method and the method based on simulated annealing, which represent heuristic and meta-heuristic methods used for the distribution network reconfiguration respectively. All presented methods are verified on the example of real distribution network and the results are presented and discussed in the paper.

**Keywords:** distribution network reconfiguration, reduction of active power losses, mixed integer programming, branch exchange, simulated annealing

**1. UVOD**

Rekonfiguracija distributivnih mreža (DM) predstavlja proces izmene njihove topološke strukture (konfiguracije), koji se postiže zatvaranjem/otvaranjem prekidačke opreme u mreži. Rekonfiguracija ima veliku primenu u upravljanju DM, gde se najčešće koristi za: smanjenje gubitaka aktivne snage [1], ravnomernu raspodelu opterećenja na napojnim transformatorima i izvodima, smanjenje padova napona (kvalitetnije naponske prilike), povećanje pouzdanosti napajanja, kao i restauraciju napajanja nakon kvarova u mreži [2].

**NAPOMENA:**

Ovaj rad proistekao je iz master rada čiji mentor je bio doc. dr Neven Kovački.

U praksi se koristi veliki broj metoda za rekonfiguraciju distributivnih mreža, koje su zasnovane na matematičkim, heurističkim i meta-heurističkim optimizacionim metodama. Cilj ovog rada jeste da prikaže po jednu iz navedenih grupa metoda i da se one uporede na primeru realne distributivne mreže.

U svim prikazanim metodama kao funkcija cilja postavljena je minimizacija gubitaka aktivne snage, dok su kao ograničenja razmatrana pogonska ograničenja i radijalna konfiguracija distributivne mreže. Takođe, u svim prikazanim metodama optimalna konfiguracija se određuje za jedan fiksni nivo opterećenja distributivne mreže, na primer za vršno opterećenje. Dakle, pristup određivanju optimalne rekonfiguracije DM u ovom radu je statički.

**2. MATEMATIČKI OPTIMIZACIONI MODEL ZA REKONFIGURACIJU DISTRIBUTIVNE MREŽE**

U ovoj glavi je prikazan optimizacioni model za rekonfiguraciju DM koji je zasnovan na mešovito-celobrojnom programiranju. U prikazanom optimizacionom modelu statusi grana ( $l$ ) (otvorena /zatvorena) predstavljeni su binarnim (0/1) promenljivama  $x_l$ , dok je režim DM predstavljen modulima i faznim stavovima ( $V_i, \theta_i$ ) fazora napona u čvorovima ( $i$ ) DM.

Kao funkcija cilja postavljena je minimizacija gubitaka aktivne snage  $P_{Loss}$ , što se zapisuje na sledeći način:

$$\min_{x_l, V_i, \theta_i} \left( P_{Loss} = \sum_{l=1}^{N_L} P_{Loss, l} = \sum_{i=1}^{N_L} (P_{ij} + P_{ji}) \right), \quad (1)$$

gde su sa  $P_{Loss}$  označeni ukupni gubici aktivne snage, sa  $P_{Loss, l}$  gubici aktivne snage u grani  $l$ ,  $N_L$  predstavlja ukupan broj grana u DM, dok  $P_{ij}(P_{ji})$  predstavlja tok aktivne snage u grani  $l$  od čvora  $i$  ( $j$ ) ka čvoru  $j$  ( $i$ ).

U datom optimizacionom modelu važe sledeća ograničenja:

1. Zavisnost tokova snaga ( $P_{ij}, Q_{ij}$ ) u granama DM  $l=1, 2, \dots, N_L$  od promenljivih odlučivanja ( $x_l, V_i, \theta_i$ ):

$$P_{ij} = x_l \{ G_l (V_i)^2 - V_i V_j [ G_l \cos(\theta_i - \theta_j) + B_l \sin(\theta_i - \theta_j) ] \} \quad (2)$$

$$Q_{ij} = x_l \{ -B_l (V_i)^2 - V_i V_j [ B_l \cos(\theta_i - \theta_j) - G_l \sin(\theta_i - \theta_j) ] \} \quad (3)$$

gde su  $G_l$  i  $B_l$  konduktansa i susceptansa grane  $l$ , respektivno.

2. Bilansi aktivnih i reaktivnih snaga u čvorovima distributivne mreže  $i=1, 2, \dots, N_N$ :

$$P_{G,i} - P_{L,i} - \sum_{j \in \Omega_i} P_{ij} = 0, \quad (4)$$

$$Q_{G,i} - Q_{L,i} - \sum_{j \in \Omega_i} Q_{ij} = 0. \quad (5)$$

gde su sa  $P_{G,i}$ ,  $P_{L,i}$  označeni proizvodnja i potrošnja aktivne snage u čvoru  $i$ , sa  $Q_{G,i}$ ,  $Q_{L,i}$  označeni su proizvodnja i potrošnja reaktivne snage u čvoru  $i$ , a sa  $\Omega_i$  skup čvorova  $j$  koji su direktno povezani sa čvorom  $i$ ,

3. Specificirani moduo i fazni stav napona u napojnom čvoru ( $i=0$ ):

$$V_0 = V_s, \quad (6)$$

$$\theta_0 = 0, \quad (7)$$

gde je  $V_s$  specificirana vrednost modula fazora napona napojnog čvora.

4. Ograničenje modula napona u čvorovima DM  $i=1,2,\dots,N_N$ :

$$V_i^{min} \leq V_i \leq V_i^{max}, \quad (8)$$

gde su  $V_i^{min}$  i  $V_i^{max}$  minimalni i maksimalni dozvoljeni napon u čvoru  $i$ , respektivno.

5. Ograničenje tokova snaga u granama distributivne mreže  $l=1,2,\dots,N_L$ :

$$(P_{ij})^2 + (Q_{ij})^2 \leq (S_l^{max})^2, \quad (9)$$

gde je  $S_l^{max}$  maksimalna dozvoljena snaga grane  $l$ ,

6. Radijalna konfiguracija razmatrane DM:

$$\sum_{i=1}^{N_1} x_i = N_N - N_{SP}, \quad (10)$$

gde je  $N_{SP}$  broj napojnih čvorova u DM.

Izrazima (1)-(10) definisan je mešovito-celobrojni nelinearni optimizacioni model za rekonfiguraciju DM. Najveći problemi navedenog optimizacionog modela jesu: 1) nelinearnost i 2) izuzetno velika dimenzionalnost. Naime, u slučaju primene na realne DM koje sadrže više hiljada čvorova, opisani model sadrži više hiljada kontinulanih i binarnih promenljivih. Ovakve optimizacione probleme je veoma teško rešiti primenom dostupnih softverskih paketa za optimizaciju. Zato se u praksi za rešavanje rekonfiguracije DM mnogo češće koriste heurističke i meta-heurističke optimizacione metode, koje su prikazane u nastavku.

### 3. METODA IZMENE GRANA

Algoritam izmene grana (eng. *Branch Exchange*) se koristi tako da se na brz i jednostavan način ispitaju promene vrednosti zadate kriterijumske funkcije usled promene mesta normalno otvorenog (NO) rasklopnog uređaja u mreži. Cilj heurističkih metoda jeste da se poznajući fiziku određenog problema u što kraćem roku dođe do kvalitetnih praktičnih, ali suboptimalnih (lokalnih) rešenja [3].

Izmena grana (IG) zapravo znači izmenu mesta NO rasklopnog uređaja sa njime spregnutim normalno zatvorenim (NZ) rasklopnim uređajem. Pod spregnutim rasklopnim uređajima podrazumeva se par NO/NZ čijom

se izmenom mesta održava napajanje svih čvorova u mreži, ali i radijalnost mreže.

Velika prednost ovog metoda je da se promena mesta NO i NZ rasklopnih uređaja proračunava na bazi relacije u kojoj figurišu samo vrednosti iz baznog režima mreže. Na taj način, izbegnuta je potreba za proračunom tokova snaga (proračunom kompletnog režima) za novu konfiguraciju mreže. Dakle, ispituje se vrednost kriterijumske funkcije za NO uređaj i svaki njemu spregnuti NZ rasklopni uređaj, nakon čega se prihvata onaj slučaj gde je ostvareno poboljšanje kriterijumske funkcije. Tek nakon tog koraka, vrši se proračun tokova snaga koji predstavlja bazni režim za sledeću iteraciju [4].

Metoda izmene grana može se predstaviti sledećim pseudo kodom:

**Ulaz:** Inicijalizacija algoritma: /\*Podaci o DM\*/

$s = s_0$ ; /\*Generisanje početnog dopustivog rešenja, npr. početna konfiguracija DM\*/

$n_{NO} = 1$ ; /\*Postavljanje brojača NO rasklopnih uređaja na 1\*/

$k = 1$ ;

**Ponavljati** /\*Globalna iteracija k\*/

**Ponavljati** /\*Za trenutno obrađivani NO rasklopni uređaj, odnosno u globalnoj iteraciji k\*/

Generisati susedno rešenje (izvršiti zamenu mesta NO rasklopnog uređaja sa njemu spregnutim NZ rasklopnim uređajem), tj. konfiguraciju  $s'$ ;

$\Delta f = f(s) - f(s')$ ; /\*Razlika ciljnih funkcija, tj. gubitaka u konfiguracijama  $s$  i  $s'$ \*/

**Ako je**  $\Delta f > 0$  **Onda**  $s = s'$ ; /\*Prihvati  $s'$  kao tekuće rešenje\*/

**Dok** /\*Uslov zaustavljanja \*/**Dok** se ne obrade svi NZ rasklopni uređaji koji su u sprezi sa trenutno obrađivanim NO rasklopnim uređajem \*/

**Dok** Kriterijum zaustavljanja /\*Dok se ne obrade svi otvoreni rasklopni uređaji u mreži\*/

**Izlaz:** Najbolje pronađeno rešenje ( $s$ )

### 4. METODA SIMULIRANOG KALJENJA

Simulirano kaljenje (eng. *Simulated Annealing*) je metoda zasnovana na lokalnom pretraživanju, uz mehanizam inspirisan procesom kaljenja čelika koji omogućuje izlazak iz lokalnog optimuma [5].

U svojoj originalnoj formi metod simuliranog kaljenja (SK) baziran je na analogiji između fizičkog procesa kaljenja metala i kombinatorne optimizacije. U fizici čvrstih materijala, metalurško kaljenje materijala predstavlja postupak u kojem se materijal zagreva do maksimalne temperature (temperatura kaljenja) na kojoj je unutrašnja struktura materijala stohastički organizovana. Postepeno hlađenje ovako zagrejanog materijala ima za posledicu da se raspored unutrašnjih elementarnih čestica materijala menja, tako da one zauzimaju manja energetska stanja, prilagođavajući se temperaturi (unutrašnja energija elementarnih čestica je proporcionalna temperaturi) [5,6].

Polazeći od početnog dopustivog rešenja metoda SK se izvršava iterativno. U svakoj iteraciji se na slučaj način generišu rešenja koja su susedna (bliska) tekućem rešenju. Koraci (rešenja) koji unapređuju kriterijumsku funkciju se uvek prihvataju. U suprotnom rešenje se prihvata sa

nekom verovatnoćom koja zavisi od tekućeg parametra koji se naziva temperatura ( $T$ ) (po analogiji sa procesom kaljenja metala) i od veličine degradacije ( $\Delta E$ ) ciljne funkcije. Degradacija ( $\Delta E$ ) predstavlja razliku u vrednosti ciljne funkcije (energije) tekućeg rešenja ( $f(s)$ ) i novog (susednog) rešenja ( $f(s')$ ). Kako se povećava broj iteracija, tj. kako se smanjuje temperatura  $T$ , verovatnoća prihvatanja lošijih rešenja se smanjuje. Ideja ovog postupka je da se prihvatanjem lošijih rešenja izbegne konvergiranje ka lokalnom optimumu, što je bio slučaj u metodi izmene grana.

Metoda simuliranog kaljenja može se predstaviti sledećim pseudo kodom:

**Ulaz:** Program (raspored) hlađenja: /\*Početna temperatura( $T_{max}$ ), Krajnja temperatura( $T_{min}$ ), Tempo (brzina) hlađenja, Broj iteracija na određenoj temperaturi\*/.

$s = s_0$ ; /\*Generisanje početnog dopustivog rešenja, tj. početne konfiguracije\*/

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

$k=1$ ;

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

**Ponavljati** /\*Na određenoj temperaturi  $T_k$ , odnosno u globalnoj iteraciji  $k$ \*/

Na osnovu tekućeg rešenja  $s$  generisati susedno (blisko) rešenje, tj. konfiguraciju DM  $s'$ , npr. izmenom statusa jednog NO rasklopnog uređaja sa spregnutim NZ rasklopnim uređajem;

$\Delta E = f(s') - f(s)$ ; /\*Razlika ciljnih funkcija, tj. gubitaka u ove dve konfiguracije\*/

**Ako je**  $E \leq 0$  **Onda**  $s = s'$  /\*Prihvati  $s'$  kao tekuće rešenje\*/

**U suprotnom** Prihvati  $s'$  sa verovatnoćom  $e^{-\Delta E/T_k}$ , odnosno prihvati  $s'$  ako važi:  $e^{-\Delta E/T_k} > \text{rand}[0,1]$ ;

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

**Dok** Uslov zaustavljanja /\*Dok se ne obrade svi otvoreni rasklopnog uređaji u mreži\*/

$T_{k+1} = \alpha \cdot T_k$ ; /\* Tempo (brzina) hlađenja,  $\alpha \in [0.5 - 0.99]$ \*/

$k=k+1$ ;

**Dok** Kriterijum zaustavljanja /\*  $T_k < T_{min}$ \*/

**Izlaz:** Najbolje pronađeno rešenje ( $s_{best}$ )

## 5. VERIFIKACIJA ALGORITMA OPTIMALNE REKONFIGURACIJE DM

Rekonfiguracija razmatrane test DM izvršena je primenom metode izmene grana, metode simuliranog kaljenja, kao i rešavanjem optimizacionog modela na bazi mešovito-celobrojnog programiranja. Na osnovu dobijenih rezultata ispitani su benefiti primene prikazanih postupaka za rešavanje problema rekonfiguracije.

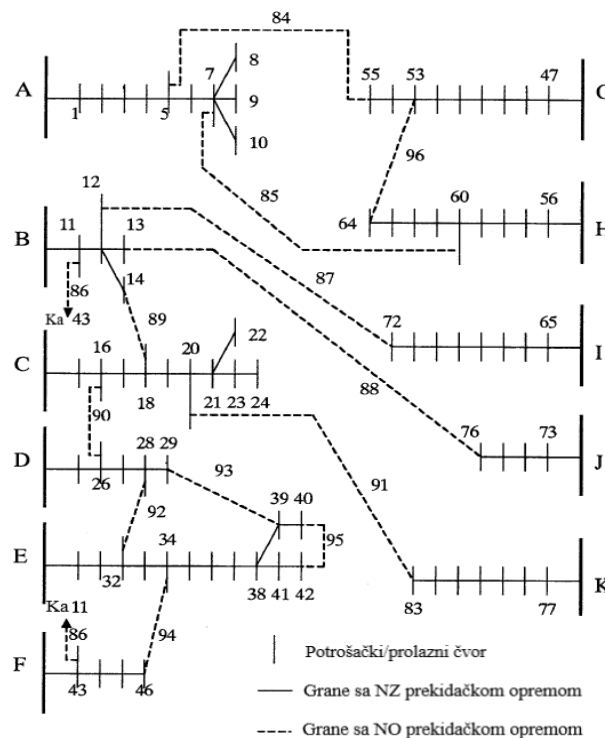
### 5.1. Opis test DM

Proračun se vrši na distributivnoj test mreži prikazanoj na slici 1. DM se sastoji od 11 sredjenaponskih izvoda označenih slovima od A do K. Nominalni napon DM mreže iznosi 11.4 kV. Parametri svih vodova i kablova dati su u [7].

Ukupan broj zatvorenih grana u mreži iznosi 83, dok je broj otvorenih grana 13. Svaka grana DM poseduje

rasklopnog uređaj čime se omogućuje promena konfiguracije DM.

Rasklopnog uređaji nisu posebno prikazani na slici 1 kako ne bi opterećivali sliku. Na slici 1 prikazani su početni i krajnji indeks čvorova na svakom izvodu, kao i indeksi onih čvorova u kojima se stiče veći broj grana.



Slika 1. Prikaz Test DM [7]

### 5.2 Rezultati proračuna

Rezultati proračuna optimalne konfiguracije mreže primenom prethodno opisanih metoda prikazani su u tabeli 1.

Kao posledica inicijalno vrlo velikog opterećenja na izvodu A, dešava se da vrednosti napona čvorova DM padnu ispod dozvoljenih minimalnih vrednosti. U slučaju naponskog nivoa od 11.4 kV, dozvoljena donja granica napona bilo kog čvorova u DM je  $V_{min} = 0.95 \cdot 11.4$  kV, odnosno  $V_{min} = 10.83$  kV.

Vrednosti napona svih čvorova koji u inicijalnoj konfiguraciji imaju manju vrednost od dozvoljene, određene su pokretanjem algoritma za proračun tokova snaga i prikazane u tabeli 1. Rezultati proračuna tokova snaga odgovaraju onima za početnu konfiguraciju (531.75 kW) datim u literaturi [7].

Rezultati prikazani u tabeli 1 pokazuju da proračun optimalne konfiguracije DM utiče i na naponske prilike u mreži. Pre samog proračuna naponi deset čvorova u mreži imali su vrednosti manje od donje naponske granice. Nakon završetka proračuna i preraspodele opterećenja po izvodima mreže postiže se i to da su naponi svih čvorova u okvirima prihvatljivih pogonskih vrednosti.

Ovi rezultati postižu se kako primenom metode IG, tako i metode SK. Naravno, postiže se i smanjenje pogonskih gubitaka aktivne snage sa inicijalnih 531.75 kW na 475.91 kW, tj. za 10.5 % u odnosu na inicijalno pogonsko stanje za slučaj kada se koristi metod IG.

Tabela 1. Rezultati proračuna

	Početna konfiguracija	Metoda IG	Metoda SK
Otvoreni rasklopni uređaji	84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96	7, 13, 32, 35, 41, 61, 72, 82, 84, 86, 89, 90, 92	7, 13, 34, 62, 72, 83, 84, 86, 89, 90, 92, 93, 95
Gubici aktivne snage [kW]	531.75	475.91	470.69
Naponi čvorova u kojima su vrednosti napona narušene, tj. manje od $V_{\min}$	$V_{\min}$ [kV]	10.830	10.830
	$V_4$	10.773	11.044
	$V_5$	10.643	10.983
	$V_6$	10.620	10.973
	$V_7$	10.602	10.912
	$V_8$	10.595	10.905
	$V_9$	10.582	10.895
	$V_{10}$	10.594	10.904
	$V_{71}$	10.818	10.860
	$V_{72}$	10.816	11.194
$V_{83}$	10.806	10.944	10.958
Broj promenjenih rasklopnih uređaja	-	12	12
Smanjenje gubitaka [%]	-	10.5 %	11.48 %

Sa druge strane primenom metode SK postiže se još bolji rezultat tako da po završetku proračuna ukupni gubici iznose 470.69 kW, što je za 11.48 % manje u odnosu na inicijalno pogonsko stanje. Ukupna injektirana aktivna snaga u mrežu se menja, njena vrednost primenom optimizacionih metoda IG i SK sa inicijalnih 28921.75 kW pada na 28859.91 kW odnosno 28820.69 kW. Na kraju, rešavanjem optimizacionog modela na bazi mešovito-celobrojnog programiranja koji je prikazan u sekciji 2 rada, nisu dobijeni očekivani rezultati. Naime, navedeni optimizacioni model je implementiran u programskom jeziku AMPL i rešavan na on-line NEOS serveru [8]. Međutim primenom dostupnih softverskih alata (eng. *solvers*) nisu dobijeni rezultati ni nakon nekoliko sati izvršavanja.

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu je opisano rešavanje rekonfiguracije DM primenom heurističkih i meta-heurističkih optimizacionih metoda, kao i metoda zasnovanih na mešovito-celobrojnog programiranju. Cilj je bio da se primenom meta-heurističkog pristupa dođe do boljih rezultata, za razliku od heurističkih metoda koje se često sreću u praksi, ali omogućavaju postizanje samo lokalnih optimuma. Na osnovu rezultata koji su prikazani u sekciji 5 vidi se da je to i postignuto, s obzirom da su ukupni gubici dobijeni primenom metode SK manji od onih koji su dobijeni metodom IG. Vrednosti ukupnih gubitaka ne razlikuju se previše, ali dobijeni rezultati su očekivani s obzirom da se metodom izmene grana dobijaju lokalni optimumi, dok je cilj metode simuliranog kaljenja da se dodje do globalnog optimuma. Da bi se na još bolji način sagledali prethodno opisani efekti ove metode trebalo bi primeniti na mrežu čija je dimenzionalnost

višeputo veća od mreže koja je korišćena pri izradi ovog rada.

Optimizacioni modeli za rekonfiguraciju distributivnih mreža zasnovani na mešovito-celobrojnog programiranju pokazali su se kao praktično neupotrebljivi čak i u slučaju manjih DM, odnosno rezultati se dobijaju nakon isuviše dugo vremena. Zbog toga ovakav pristup rekonfiguraciji distributivnih mreža potpuno gubi na smislu kada su u pitanju realne DM velikih dimenzija.

## 7. LITERATURA

- [1] D.Popović, D.Bekut, V.Dabić: *Specijalizovani DMS Algoritmi*; Prosveta, Novi Sad, 2011.
- [2] V.Fathi, H.Seyedi, B.M.Ivatloo: *Reconfiguration of distribution systems in the presence of distributed generation considering protective constraints and uncertainties*; Int. Trans Electr Energy Systems; February 2020;pp. 1-25; DOI: 10.1002/2050-7038.12346
- [3] N.Kovački: *Operativno planiranje rekonfiguracije distributivnih mreža primenom višekriterijumske optimizacije*; Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2017.
- [4] D.Babić: *Optimalna rekonfiguracija distributivne mreže*; Master rad, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2016.
- [5] Ž.Popović: *Planiranje razvoja distributivnih mreža u prisustvu neizvesnosti*; Doktorska disertacija, Fakultet tehničkih nauka, Novi Sad, 2011.
- [6] M.Stojkov, A.Softić, M.Atić: *Optimization of switching conditions in distribution power subsystem*; Tehnički Vjesnik, 2015; 22(5): 1297-1303. 10.17559/TV-20141211120022.
- [7] Ching-Tyong Su, Chu-Sheng Lee: *Network reconfiguration of distribution systems using improved mixed-integer hybrid differential evolution*; Power Delivery, IEEE Transactions on. 18. 2003; 1022 - 1027. 10.1109/TPWRD.2003.813641.
- [8] <https://neos-server.org>

## Kratka biografija



**Dario Kanjo** rođen je u Somboru 1996. god. Diplomski rad na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi odbranio je 2019. godine.



**Neven Kovački** rođen u Zrenjaninu, 1987. god. Diplomirao je, masterirao i doktorirao na Fakultetu tehničkih nauka iz oblasti Elektrotehnike i računarstva – Elektroenergetski sistemi redom 2010, 2011. i 2018. godine.