

Deni Četković, mag.ing.el.  
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[deni.cetkovic@hep.hr](mailto:deni.cetkovic@hep.hr)

Nikola Bogunović, dipl.ing.el.  
HEP – ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[nikola.bogunovic@hep.hr](mailto:nikola.bogunovic@hep.hr)

## ODREĐIVANJE OPTIMALNE POZICIJE UGRADNJE NN REGULATORA NAPONA PRIMJENOM GENETSKOG ALGORITMA

### SAŽETAK

Zbog velikog broja novih potrošača disperziranih unutar vrlo dugačkog NN strujnog kruga napajanog iz TS G.Jelenje pojavila se potreba za ugradnjom regulatora napona radi zadovoljavanja propisanih granica. Kako bi se u naselju na kraju NN vođa moglo priključiti čim veći broj potrošača traženju optimalne pozicije ugradnje pristupilo se primjenom genetskog algoritma. NN mreža i potrošači prikazani su matričnim zapisima a pozicija ugradnje i drugi parametri regulatora kao kromosom genetskog algoritma. Napisani algoritam je selekcijom, križanjem i mutacijom kromosoma kroz generacijski razvoj predlagao poboljšana rješenja. Svako od milijun predloženih rješenja pozicije ugradnje regulatora prošlo je kroz kontrolni proračun te je evolucijom pronađeno optimalno rješenje za poziciju ugradnje.

**Ključne riječi:** regulator napona, optimizacija, genetski algoritam

## OPTIMAL ALLOCATION OF LOW VOLTAGE REGULATOR USING GENETIC ALGORITHM

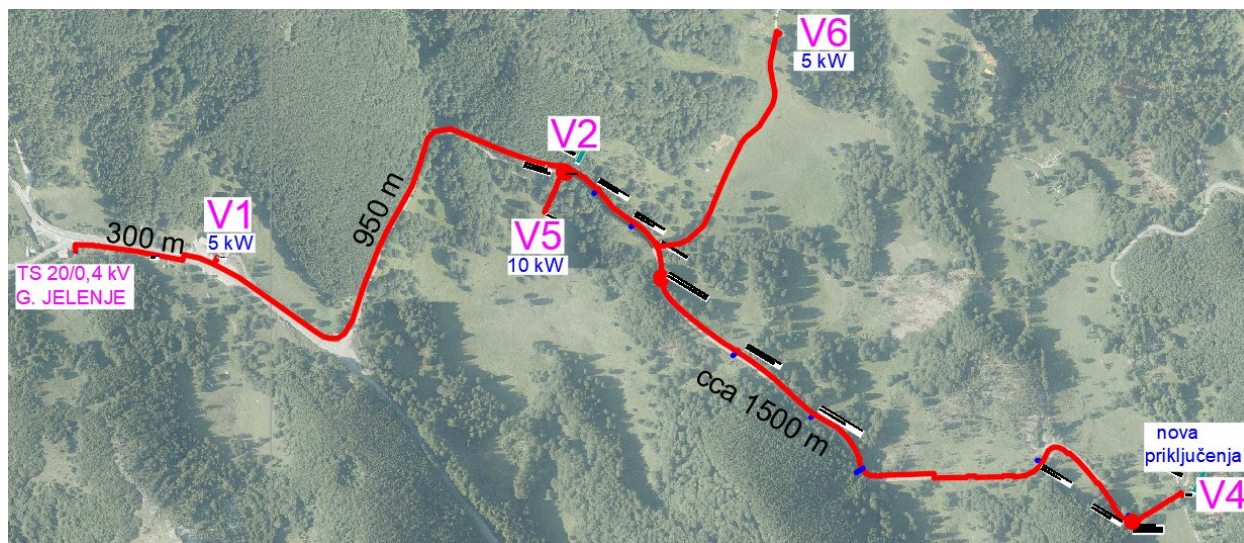
### SUMMARY

Due to the large number of new LV consumers dispersed within the very long circuit supplied by TS G. Jelenje, there was a need to install a voltage regulator to meet the prescribed voltage limits. In order to connect as many consumers as possible at the end of the LV, the search for the optimal installation position was started by applying a genetic algorithm. LV network and the consumers are represented by matrix records and the embedding position and other regulator parameters as the chromosome of the genetic algorithm. The written algorithm proposed improved solutions by selection, crossing and mutation of chromosomes through generation development. Each of the million proposed regulator position solutions has gone through a control voltage calculation, and by evolution the optimal solution for the installation position has been found.

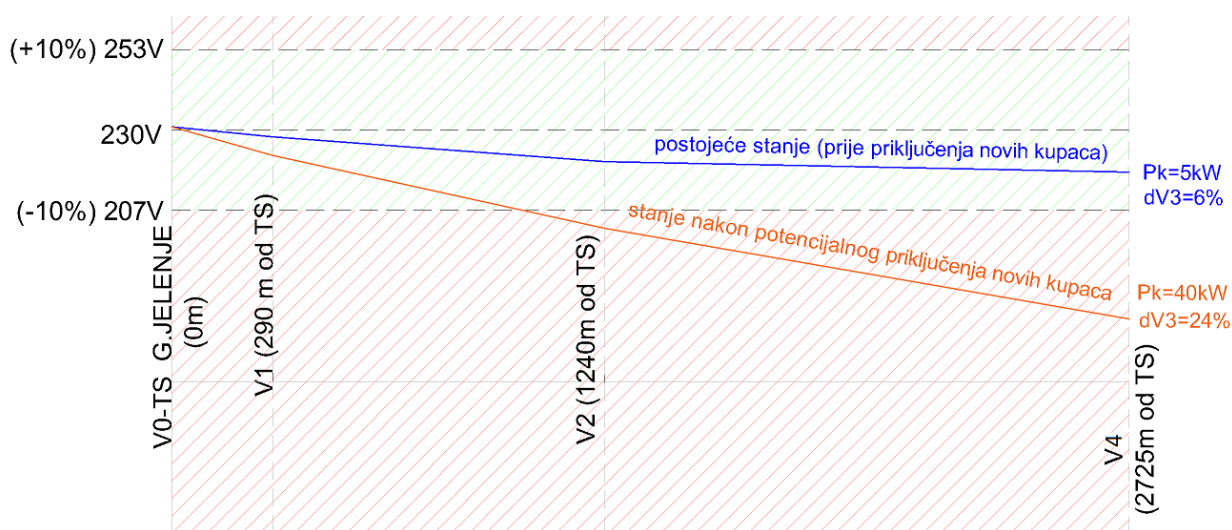
**Key words:** voltage regulator, optimization, genetic algorithm

## 1. UVOD

Na području naselja Lepenice javila se potreba za priključenjem većeg broja novih potrošača čije bi priključenje na postojeću NN mrežu napajanu iz TS G.Jelenje rezultiralo velikim padovima napona koji bi značajno prelazili dozvoljene padove napona od 10%.



Slika 1. Prostorna situacija NN strujnog kruga napajano iz TS Jelenje



Slika 2. Naponski dijagram NN strujnog kruga napajano iz TS Jelenje

Na Slici 2. prikazane su naponske prilike u predmetnom NN strujnom krugu napajanom iz TS Jelenje. Plava linija prikazuje napon u NN izvodu sa postojećom potrošnjom, odnosno potrošnjom prije priključenja novopredviđenih kupaca. Vidljivo je kako je bez obzira na duljinu strujnog kruga zbog relativno male ukupne potrošnje napon unutar propisanih granica.

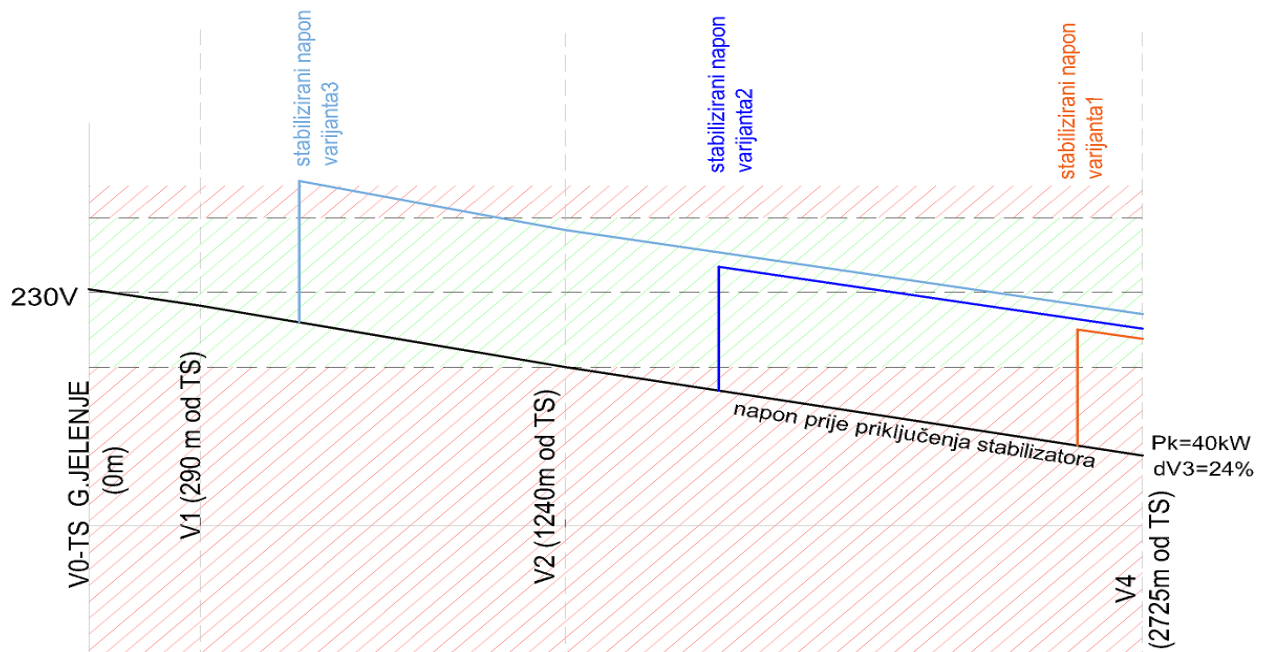
Narančasta linija prikazuje naponske prilike na NN izvodu nakon potencijalnog priključenja novih kupaca. Vidljivo je kako bi vrijednost napona pala značajno ispod propisanih naponskih granica.

Uobičajeno rješenje gradnje nove transformatorske stanice osim problema kao što su dugotrajnost ishođenja dozvola i troškova izgradnje trafostanice iziskivalo bi i izgradnju sredjenaponskog voda u duljini od 1km. Procijenjena izgradnja takvog voda je 300 000 kuna.

Zbog svega navedenog kao i zbog testiranja novog tehnološkog rješenja pristupilo se ugradnji regulatora napona u postojeću NN mrežu.

## 2. PROBLEMATIKA ODABIRA POZICIJE REGULATORA NAPONA

Obzirom da bi se osim već zatraženih priključenja u budućnosti mogao pojaviti i manji dio novih zahtjeva za priključenjem pojavila se potreba za pronalaskom optimalne pozicije regulatora napona kako bi se u potrošačkom području naselja NN Lepenice koje se nalazi na kraju mreže mogao priključiti čim veći broj potrošača.



Slika 3. Prikaz naponskog dijagrama za određene slučajeve ugradnje

Pozicija ugradnje regulatora napona direktno utječe na maksimalnu snagu koja će se moći isporučiti u mreži. Ukoliko regulator ugradimo u jednom dijelu NN mreže možemo na tom području ostvariti savršene naponske prilike a zanemariti drugi dio mreže pa u njemu imati prevelike padove napona. Kao što je vidljivo na Slici 3. ugradnja regulatora prema varijanti 1 omogućila bi povoljne naponske prilike u naselju Lepenice na kraju mreže (V4) no u velikom dijelu mreže napon bi bio ispod propisanih granica pa bi eventualno priključenje drugih potrošača bilo nemoguće.

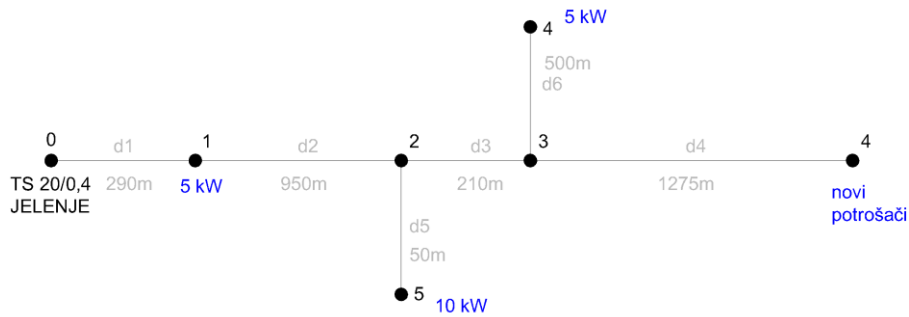
Iz dijagrama je također vidljivo kako bi za svako od nekoliko razmatranih rješenja bilo moguće još malo povećati snagu te bi se i dalje moglo naći rješenje ugradnje regulatora na drugoj poziciji koje bi zadovoljilo naponska ograničenja. Iz svega navedenog pojavila se potreba za pronalaskom optimalne pozicije regulatora napona.

## 3. ODABIR OPTIMALNE POZICIJE REGULATORA NAPONA PRIMJENOM GENETSKOG ALGORITMA

Tražnju optimalne lokacije regulatora napona pristupilo se primjenom genetskog algoritma. Ovaj algoritam omogućuje da se u za određeni optimizacijski problem u vrlo kratkom roku isproba vrlo veliki broj različitih varijanti rješenja te pronade najbolje rješenje.

### 3.1. Modeliranje elemenata mreže za kontrolne proračune padova napona i tokova snaga

Elementarni kriterij koji treba zadovoljiti prilikom odabira pozicije regulatora napona je da za tu poziciju svi potrošači na NN izvodu imaju napon u propisanim granicama  $\pm 10\%$ . Iz tog razloga potrebno je modelirati NN mrežu kako bi se za svako predloženo rješenje ugradnje mogao izvršiti kontrolni proračun pada napona. Mreža je modelirana korištenjem „backward-forward sweep“ metode [1] [2] [3].



Slika 5. Model NN mreže za koji je provedena optimizacija

Topologija niskonaponske mreže sa 6 vodova i 6 čvorova prikazana je:

- matricom dimenzija 6x6 koja definira početne i krajnje čvorove te vektorom 1x6 kojime su definirane snage u čvorovima

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$P = [5 \ 0 \ 0 \ 0 \ 10 \ 5];$$

- vektorima 1x6 kojima su definirane duljine dionica(vodova) i njihovi jedinični parametri:

$$l_m = [0.29 \ 0.95 \ 0.21 \ 1.275 \ 0.05 \ 0.5];$$

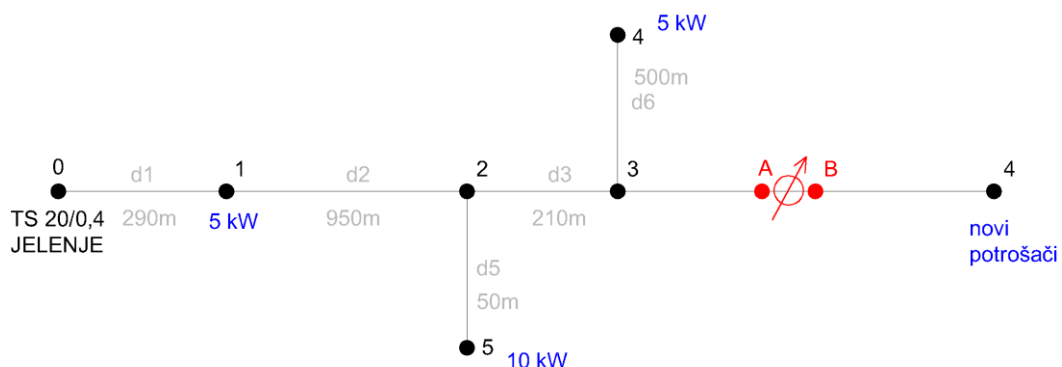
$$R_l = [0.212 \ 0.212 \ 0.203 \ 0.203 \ 0.212 \ 0.319];$$

$$X_l = [0.08 \ 0.08 \ 0.08 \ 0.08 \ 0.08 \ 0.082];$$

Iz navedenih podataka gotovim programskim rješenjima moguće je izvršiti kontrolni proračun padova napona.

### 3.2. Modeliranje mreže s ugrađenim regulatorom

U svrhu ugradnje regulatora u predmetnu NN mrežu postojeće rješenje modificirano je na način da se prilikom definiranja pozicije regulatora kreiraju dva nova čvora te se za svaku predloženu poziciju ugradnje kreira nova matrica dimenzija 8x8 koja osim postojećih čvorova NN mreže obuhvaća i dva nova čvora između kojih se priključuje regulator napona.



Slika 6. Novi čvorovi NN mreže koja se modelira

$$M_S = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

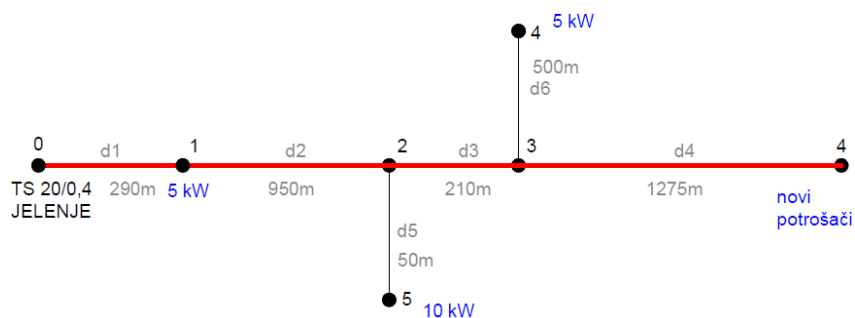
Novo programsko rješenje će prilikom izvođenja proračuna padova napona između dva predmetna čvora izvršiti stabilizaciju napona odnosno sukladno našim potrebama u predmetnom slučaju podignuti napon za 15% ili 20%.

### 3.3. Traženje početnog prijedloga ugradnje odnosno prve generacije genetskog algoritma

Kao ulazni podaci genetskog algoritma (kromosom) odabrani su:

#### A. Pozicija regulatora napona

Za moguće pozicije ugradnje regulatora napona odabran je glavni vod, dakle moguće ga je smjestiti na dionici 0-1-2-3-4.



Slika 7. Dionice odabrane za ugradnju regulatora napona

#### B. Korak stabilizacije napona

Algoritmu se dopušta davanje prijedloga za podizanjem napona od 15 ili 20%.

#### C. Snaga potrošača na kraju voda (u čvoru 4)

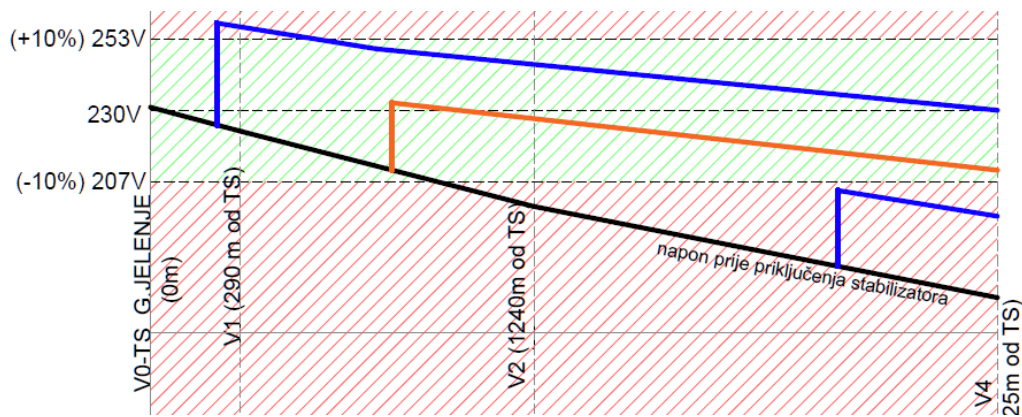
Algoritmu se dopušta davanje prijedloga snage na kraju voda u rasponu od 5 do 70 kW.

Genetski algoritam nasumično traži početno rješenje (npr. ugradnja regulatora na poziciji 2100 m od TS uz podizanje napona 15% te snagu na kraju voda od 20 kW).

Početno rješenje biti će odabrano tek kada se kontrolnim proračunom potvrdi kako su za predmetno rješenje naponske prilike na vodu zadovoljavajuće.

Primjerice, za situaciju prikazanu na naponskom dijagramu (slika 8) programirani algoritam odbaciti će prijedloge ugradnje ucrtane plavom bojom. U prvom slučaju, ugradnjom regulatora između čvorova V0 i V1 napon potrošača u točki V1 mogao bi doći na vrijednost veću od 253 V. U varijanti ugradnje između čvorova V2 i V4 napon bi u velikom dijelu NN strujnog kruga bio ispod propisane vrijednosti.

Tek će srednje rješenje, ugradnju između V1 i V2 algoritam prihvatiti kao moguće rješenje jer je za taj prijedlog ugradnje napon u svim čvorovima u propisanim granicama.



Slika 8. NN mreža koja se modelira

### 3.4. Traženje optimalnog rješenja ugradnje generacijskim razvojem

Prva generacija genetskog algoritma sačinjava 100 kromosoma (rješenja ugradnje), odnosno 100 različitih prijedloga pozicije ugradnje, naponskog koraka i snage na kraju voda.

```

populacija = [2100m +15% 20kW
               32m +20% 11kW
               1129m +20% 32kW
               ... ..
               ... ..
               ... ..
               2118m +15% 28kW];

```

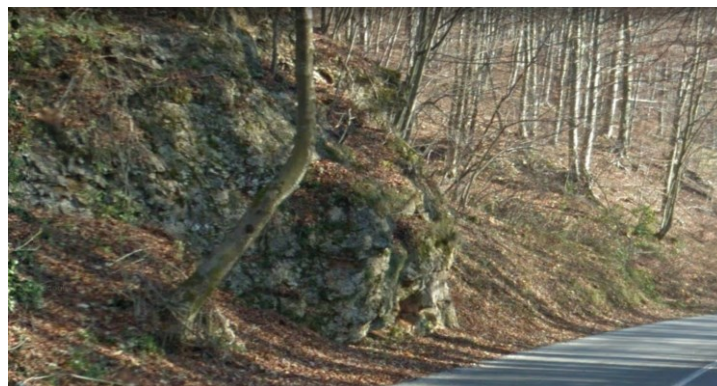
Slika 9. Matrica sa prijedlozima optimalnog rješenja ugradnje

Svako od ovih rješenja zadovoljava naponske prilike no među početnom populacijom postoje bolja i lošija rješenja. Bolja rješenja su rješenja koja omogućuju veći priključnu snagu na kraju voda.

Na početnu matricu rješenja primijenjuju se koraci genetskog algoritma. Selekcijom, križanjem i mutacijom dobiva se nova generacija poboljšanih rješenja. Svako novo rješenje mora prvo biti potvrđeno kontrolnim proračunom padova napona. Ukoliko algoritam predloži rješenje ugradnje temeljem kojeg bi se dijelu potrošača u mreži pojavio napon koji se ne nalazi u propisanim granicama (+-10% odnosno od 207/360V do 253V/440V) kontrolni kod odbacuje takvo rješenje.

### 3.5. Prilagodba algoritma prilikama na terenu

Na dijelu terena zbog nemogućnosti građevinskog smještaja regulatora kao i zbog neriješenih imovinsko-pravnih odnosa nije moguće ugraditi regulator napona. Iz tog razloga algoritmu je onemogućeno da predlaže rješenja ugradnje na tim dionicama.



Slika 10. Jedna od dionica na kojima zbog blizine županijske ceste i konfiguracije okolnog terena nije moguće smjestiti regulator napona

Modificiran je i kontrolni proračun padova napona na način da se provjerava napon potrošača tako da bude u granicama  $\pm 10\%$  dok se na ulaznoj i izlaznoj strani regulatora napona i na svim mjestima gdje se ne očekuje priključak potrošača omogućuje i blago odstupanje.

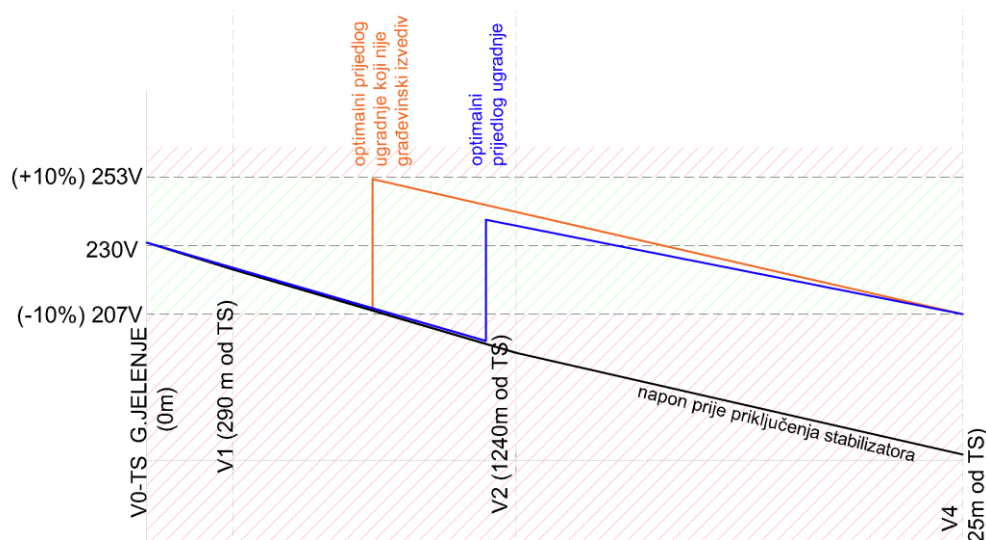
### 3.6. Optimalno rješenje ugradnje regulatora napona

Temeljem opisanih koraka isprogramirani genetski algoritam izvršio je potragu za najboljim rješenjem te je tijekom sto generacija predlagao otprilike milijun rješenja. Za svako od tih rješenja izvršen je kontrolni proračun padova napona te je veći dio odbačen a manji ušao u procese reprodukcije.

Algoritam je nakon 100 generacija predložio sljedeće optimalno rješenje ugradnje:

**NAJBOLJI KROMOSOM = [1090m +20% 53.5 kW]**

To rješenje prikazano je narandastom bojom na naponskom dijagramu (Slika 11.). No zbog građevinskih razloga (blizina ceste, slijev vode, nemogućnost rješavanja imovinsko pravnih odnosa) na predmetnoj lokaciji nije bilo moguće smjestiti regulator napona.



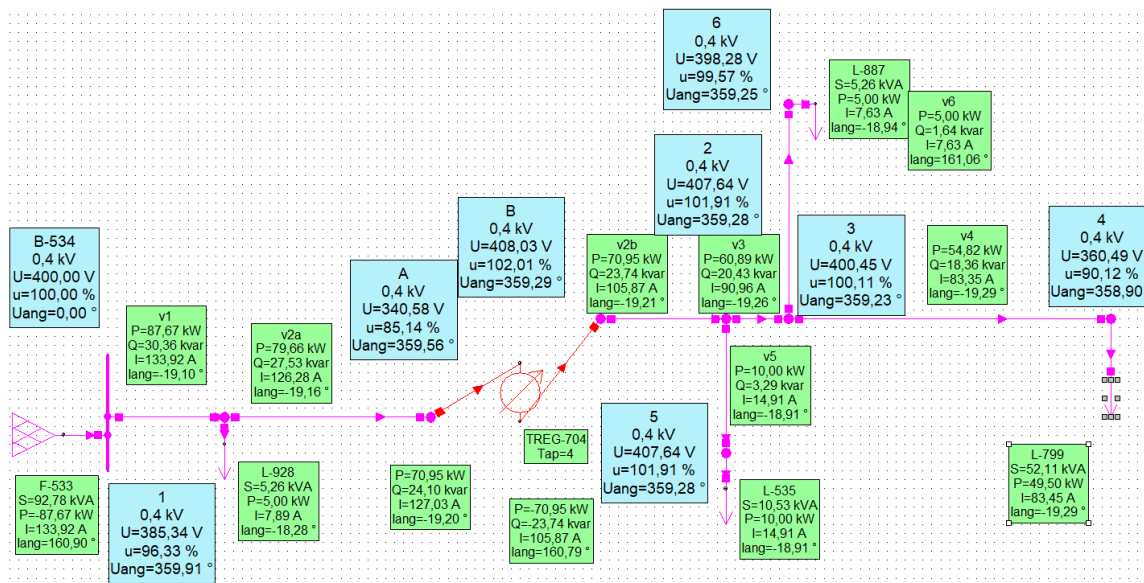
Slika 11. Naponski dijagram za dva optimalna rješenja ugradnje regulatora

Stoga je, kako je ranije objašnjeno, algoritam modificiran na način da je onemogućen prijedlog lokacije na dionicama gdje regulator građevinski nije moguće izvesti. Također je omogućeno da napon u čvorovima gdje se priključuje regulator može varirati sve dok je napon kod potrošača unutar propisanih granica.

Slijedom navedenog algoritam je predložio sljedeće rješenje koje je na dijagramu (Slika 9.) prikazano plavom bojom.

**NAJBOLJI KROMOSOM = [1520m +20% 49.5 kW]**

Provjerom predmetnog rješenja u programskom paketu Neplan dobiveni su rezultati prikazani na Slici 12.



Slika 12. Provjera optimalnog rješenja u NEPLAN-u

Sa Slike 12. je vidljivo kako je za predmetno rješenje ugradnje napon kod svih potrošača unutar propisanih granica (u trenutku maksimalne potrošnje).

Iz naponskog dijagrama je vidljivo kako je algoritam prepoznao kritične točke niskonaponske mreže te optimalno locirao regulator prije čvora 2. U protivnom bi upravo naponske prilike u čvoru 2 limitirale daljnje povećanje snage u čvoru 4.

#### 4. ZAKLJUČAK

Pozicija ugradnje regulatora napona direktno utječe na maksimalnu snagu koja će se moći isporučiti u mreži. Ukoliko regulator ugradimo u jednom dijelu NN mreže možemo na tom području ostvariti savršene naponske prilike no tako možemo zanemariti drugi dio mreže pa u njemu imati prevelike padove napona.

Razrađenom metodologijom omogućeno je sagledavanje svih faktora koje utječu na smještaj regulatora napona te je određeno optimalno rješenje ugradnje koje sagledava sanaciju naponskih prilika na kompletnom vodu i omogućuje priključenje maksimalnog broja potrošača u naselju na kraju NN izvoda.

#### 5. LITERATURA

- [1] Haque, M. H. A General Load Flow Method for Distribution System. // Electric Power System Research. 54, 1(2000), pp. 47-54.
- [2] Hamouda, S. A.; Zehar, K. Efficient Load Flow Method for Radial Distribution Feeders. // Journal of Applied Sciences. 6, 13(2006), pp. 2471-2478.
- [3] Prenc, R., Škrlec, D., Komen, V., "A novel load flow algorithm for radial distribution networks with dispersed generation", Tehnički vjesnik – Technical Gazette, Vol. 20, No., 6, December 2013., str. 969-977.