

Ivan Dundović  
HEP-ODS d.o.o.  
[ivan.dundovic@hep.hr](mailto:ivan.dundovic@hep.hr)

Ante Šoštarčić  
HEP-ODS d.o.o., Elektroslavonija Osijek  
[ante.sostaric@hep.hr](mailto:ante.sostaric@hep.hr)

Sandro Dubrović  
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[sandro.dubrovic@hep.hr](mailto:sandro.dubrovic@hep.hr)

dr.sc. Alen Pavlinić  
Energetski institut Hrvoje Požar  
[alen.pavlinic@eihp.hr](mailto:alen.pavlinic@eihp.hr)

Renato Ćučić  
HEP-ODS d.o.o.  
[renato.cucic@hep.hr](mailto:renato.cucic@hep.hr)

Nino Vrandečić  
HEP-ODS d.o.o., Elektroslavonija Osijek  
[nino.vrandecic@hep.hr](mailto:nino.vrandecic@hep.hr)

Deni Ćetković  
HEP-ODS d.o.o., Elektroprimorje Rijeka  
[deni.cetkovic@hep.hr](mailto:deni.cetkovic@hep.hr)

## ISKUSTVA PRI UVOĐENJU NOVE TEHNOLOGIJE REGULATORA NAPONA U NISKONAPONSKE MREŽE

### SAŽETAK

U slučaju kada naponske prilike u niskonaponskim mrežama nisu zadovoljavajuće kao jedno od tehničkih rješenja za njihovu sanaciju može se upotrijebiti regulator napona. Ugradnjom regulatora napona moguće je na brz i učinkovit način iznos napona svesti unutar granica definiranih normom HRN EN 50160. Regulator napona predstavlja jednu od alternativa proširenju mreže odnosno izgradnji nove transformatorske stanice. U referatu je opisan princip rada regulatora napona i njegove osnovne karakteristike te iskustva prilikom njegove ugradnje i uporabe u distribucijskim područjima Elektroslavonija Osijek, Elektroprimorje Rijeka i Elektroistra Pula.

**Ključne riječi:** kvaliteta električne energije, niskonaponska mreža, regulator napona, sanacija naponskih prilika

## EXPERIENCES IN INSTALLATION OF NEW TECHNOLOGY VOLTAGE REGULATOR INTO THE LOW VOLTAGE GRID

### SUMMARY

In case the voltage conditions in the low voltage networks are not satisfactory, voltage regulator can be used as one of the technical solutions for their improvement. By installing a voltage regulator it is possible to quickly and efficiently improve voltage conditions to meet the requirements defined in standard HRN EN 50160. Voltage regulator represents one of the alternatives to the extension of the network or the construction of a new transformer station. This paper describes the principle of operation of the voltage regulator and its basic characteristics, also experiences in its installation and use in distribution areas of Elektroslavonija Osijek, Elektroprimorje Rijeka and Elektroistra Pula.

**Key words:** electric power quality, low voltage grid, voltage regulator, improvement of voltage conditions

## 1. UVOD

Kvaliteta napona predstavlja usklađenost izmjerenih značajki napona na mjestu preuzimanja i/ili predaje električne energije s vrijednostima navedenim u hrvatskoj normi HRN EN 50160:2012. Tehnički parametri kvalitete električne energije promatraju se preko opskrbnog napona odnosno njegovog iznosa, valnog oblika, frekvencije i mogućih smetnji te su definirani kao:

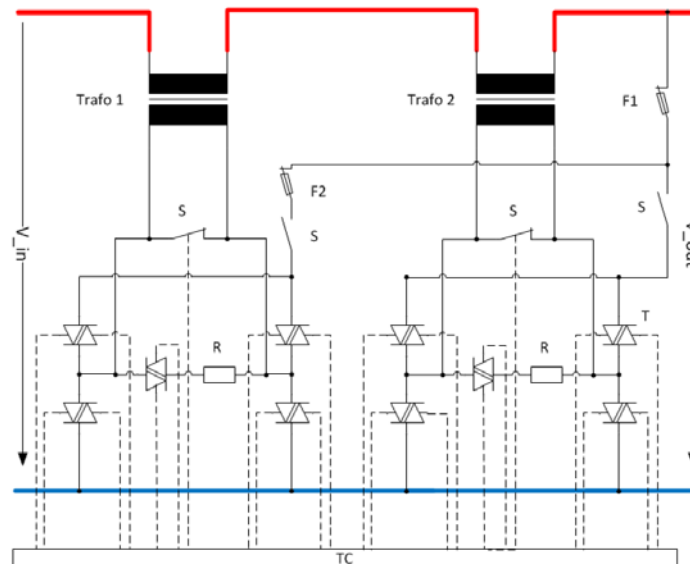
- mrežna frekvencija
- promjene napona
- treperenje napona (*eng. flicker*)
- nesimetrija napona
- naponi viših harmonika
- naponi međuharmonika
- signalni naponi

U mrežama s dugim niskonaponskim izvodima uslijed velikog pada napona duž voda naponske prilike mogu biti narušene te predmetni tehnički parametri kvalitete napona neće zadovoljavati vrijednosti propisane normom HRN EN 50160. Narušene naponske prilike mogu onemogućavati normalan rad električnih uređaja ili uzrokovati njihovo trajno oštećenje.

Jedno od tehničkih rješenja za sanaciju naponskih prilika je regulator napona koji zbog minimalnih zahvata na mreži i brzine instalacije može biti privremena alternativa proširenju mreže odnosno izgradnji nove transformatorske stanice.

### 1.1. PRINCIP RADA REGULATORA NAPONA

Princip rada regulatora napona temelji se na linearnoj regulaciji, a regulator se sastoji od elektroničkih sklopova koji rade u linearnom režimu rada i dva transformatora. Izlazni napon se regulira kombinacijom različitih prijenosnih omjera transformatora, a spajanje i odspajanje namota se provodi sklapanjem tiristora.



Slika 1. Jednofazni dijagram regulatora napona

Snaga regulatora je u rasponu od 22 kVA do 630 kVA, a maksimalan raspon regulacije iznosi od  $\pm 6\%$  do  $\pm 24\%$  te se regulacija vrši u 9 koraka. Primjer regulatora čiji je opseg regulacije  $\pm 20\%$  prikazan je u Tablici I. iz kojeg je vidljivo da se određeno povećanje ili smanjenje izlaznog napona određuje različitim kombinacijama prijenosnog omjera pojedinog transformatora.

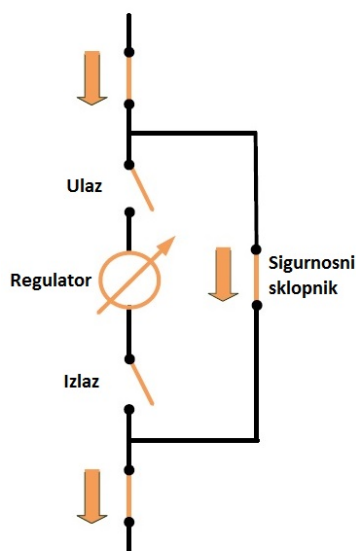
Tablica I. Stupnjevi regulacije

Trafo 1	Trafo 2	Korak
15%	5%	20%
15%	0	15%
15%	-5%	10%
0	5%	5%
0	0	0
0	-5%	-5%
-15%	5%	-10%
-15%	0	-15%
-15%	-5%	-20%

Upravljački krugovi regulatora napona generiraju kontrolne signale tiristorima koji svojim sklapanjem spajaju ili odspajaju određene namote transformatora. Uklapanje tiristora se odvija u vrlo kratkom vremenu na način da se prati magnetski tok transformatora kako prilikom sklapanja ne bi došlo do većih propada napona, povećanja struje i generiranja harmonika.

Regulacija se odvija na temelju mjerenja napona na sabirnicama ili opterećenja odnosno izlazne struje. U slučaju kada se regulacija odvija temeljem mjerenja izlazne struje, funkcija impedancije mora biti aktivirana u postavkama regulatora te se nakon toga unosi vrijednost impedancije od regulatora do točke u kojoj se želi regulirati napon. Ukoliko je vrijednost impedancije postavljena na  $0 \Omega$  kompenzacija se ne provodi.

Također, omogućena je i funkcija simetriranja tereta obzirom da se regulacija napona odvija zasebno u sve tri faze. Kod poremećaja kratkog trajanja u svrhu sprječavanja nepotrebne prorade regulatora mjeri se trajanje i iznos napona i na osnovu unaprijed postavljenih vrijednosti odlučuje o vremenu prorade. U slučaju kvara regulatora, njegovih elektroničkih komponenata ili djelovanja osigurača automatski dolazi do uklapanja sigurnosnog sklopnika koji premošćuje uređaj te izlazni napon ostaje nereguliran.



Slika 2. Dijagram načina rada kada je premošten regulator napona (eng. bypass mode)

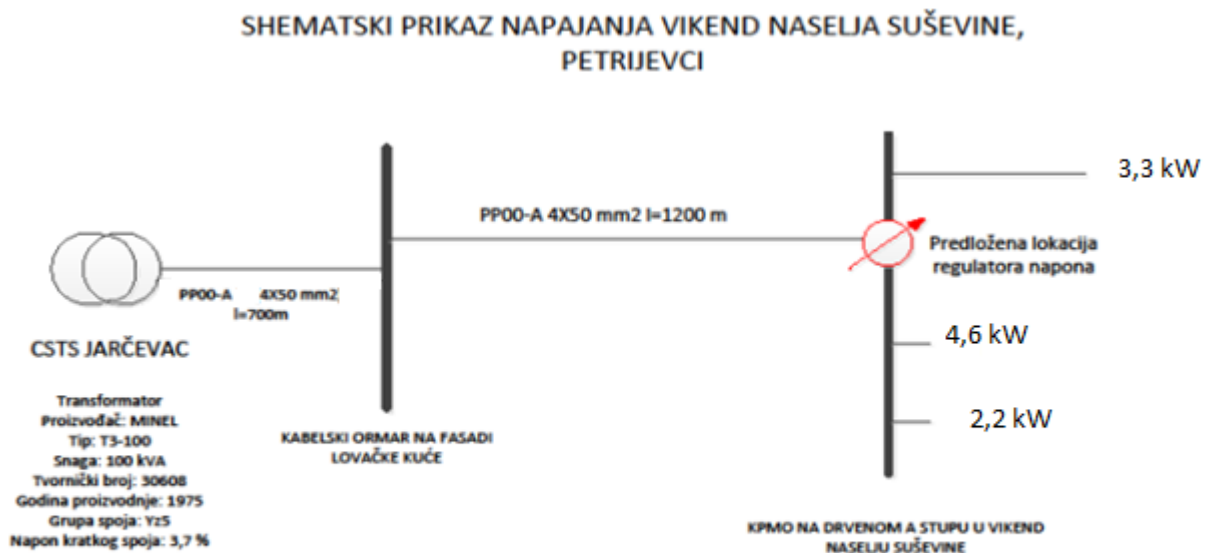
## 2. ISKUSTVA ELEKTROSLAVONIJE PRI UVOĐENJU REGULATORA NAPONA

### 2.1. Lokacija ugradnje

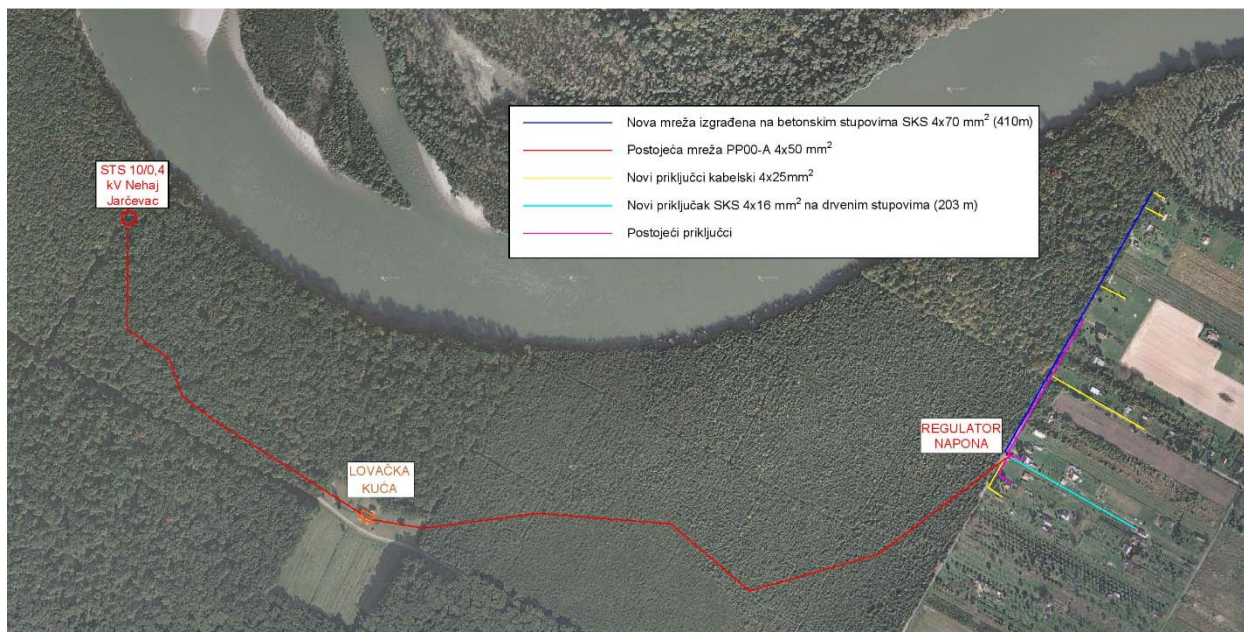
Zbog učestalih prigovora postojećih potrošača na loše naponske prilike u vikend naselju Suševine u Petrijevcima izrađena je analiza postojećeg stanja niskonaponske mreže i priključaka te dan prijedlog sanacije naponskih prilika.

Jedno od rješenja za sanaciju naponskih prilika bila je izgradnja transformatorske stanice, međutim zbog dugotrajnog procesa počevši od projektne zadaće pa do puštanja u rad odlučeno je da će se ugraditi regulator napona. Prilikom odabira regulatora vodilo se računa da regulacija napona bude što veća te se odabrao regulator koji ima mogućnost regulacije  $\pm 20\%$  i nazivne snage 70 kVA zbog mogućeg priključenja novih potrošača.

Kao mjesto ugradnje regulatora napona odabran je završetak niskonaponskog kabela iz transformatorske stanice 10/0,4 kV Jarčevac ukupne duljine 1900 m. U tom trenutku regulator napona je bio na kraju mreže, ali je planirana izgradnja nove niskonaponske mreže i priključenje 10 novih potrošača. Paralelno je rađena projektna dokumentacija za regulator i niskonaponsku mrežu kao i postupci izdavanja elektroenergetskih suglasnosti. Nedugo nakon što je pušten regulator napona u rad, priključeno je novih 6 potrošača. U ovom trenutku ukupan broj potrošača na vikend naselju Suševine je 9 (3 postojeća potrošača i 6 novih potrošača).



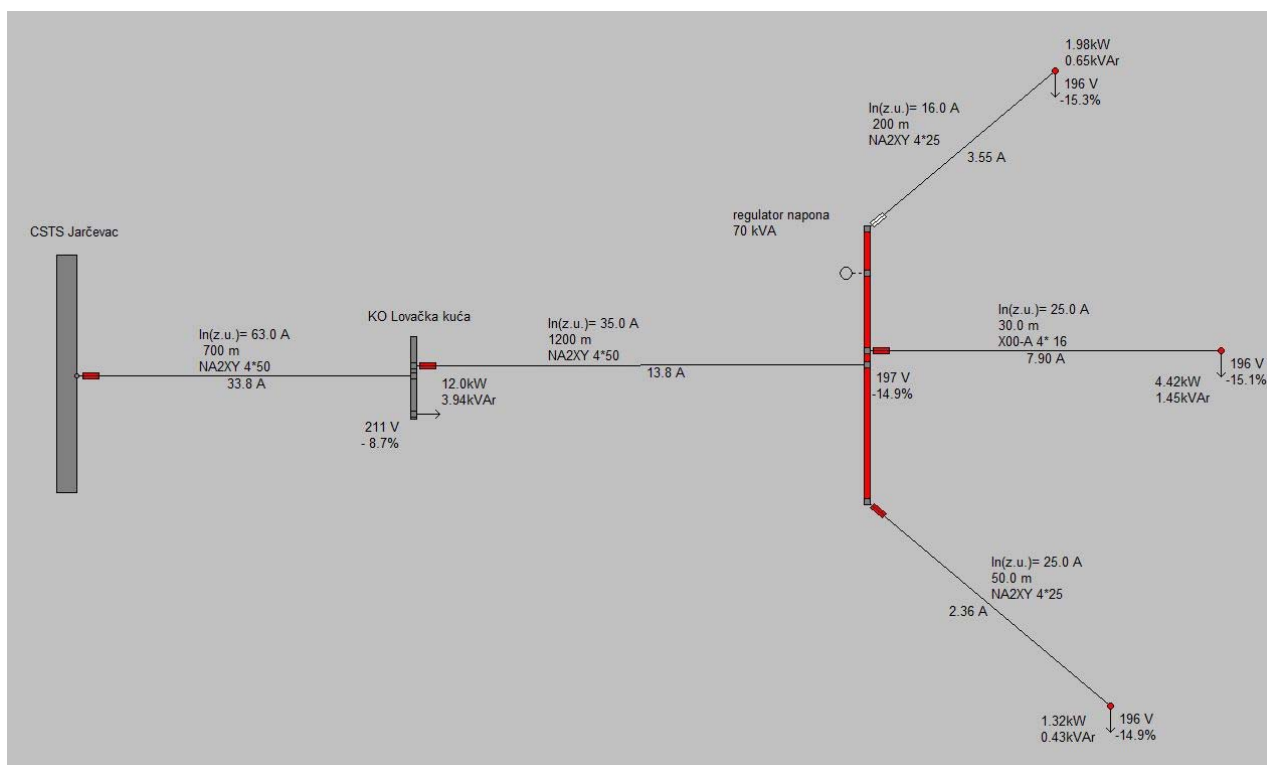
Slika 3. Predložena lokacija ugradnje regulatora napona



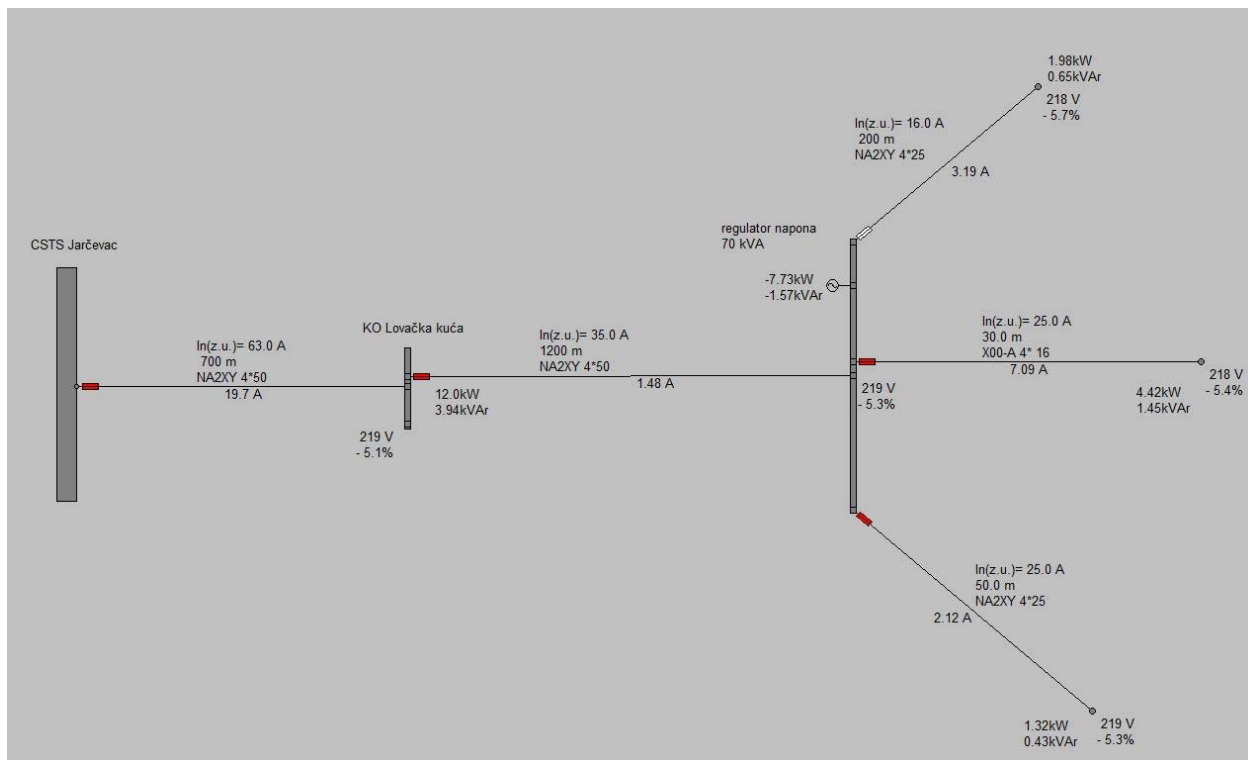
Slika 4. Shematski prikaz vikend naselja Suševine nakon priključenja novih potrošača

## 2.2. Usporedba rezultata mjerenja prije i poslije ugradnje regulatora

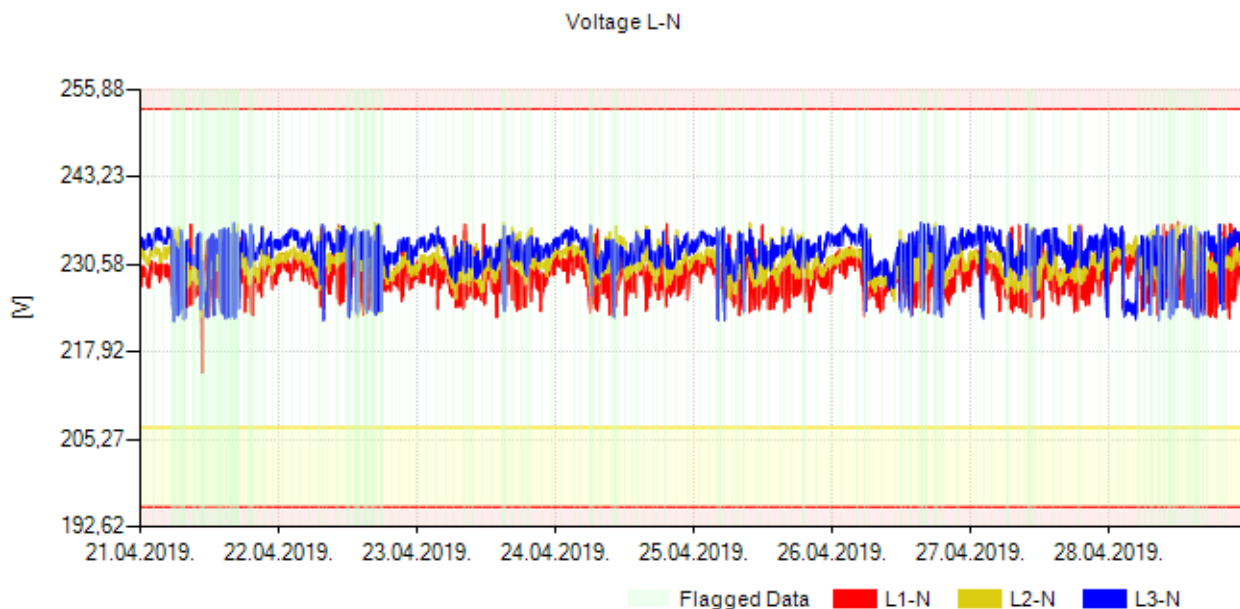
Kroz cijeli projekt ugradnje regulatora napona rađene su analize padova napona kao i mjerenja napona na ključnim mjestima (izlaz iz regulatora, kraj niskonaponske mreže i kod krajnjih potrošača).



Slika 5. Proračun pada napona prije ugradnje regulatora

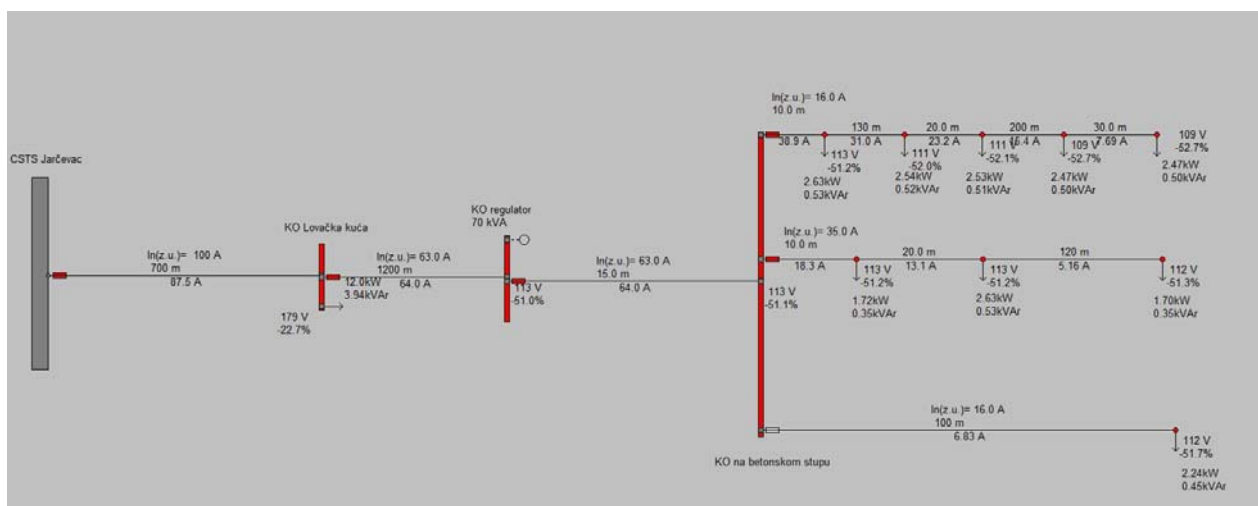


Slika 6. Proračun pada napona nakon ugradnje regulatora prije priključenja novih potrošača

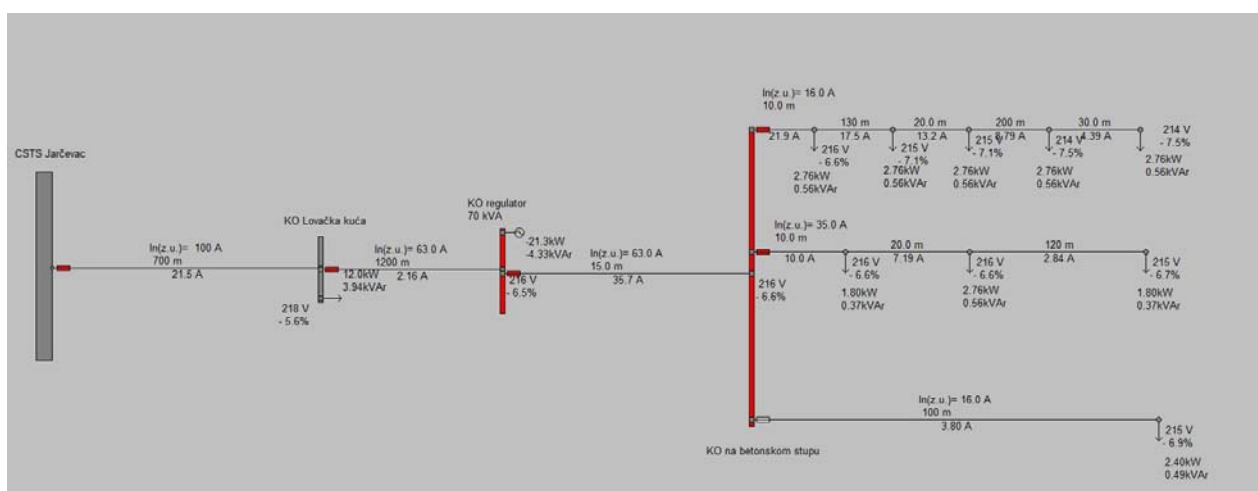


Slika 7. Trend faznog napona na izlazu iz regulatora prije priključenja novih potrošača

Prije ugradnje regulatora napona na vikend naselju Suševine fazni napon je bio ispod dopuštenih vrijednosti što smo dokazali mjerenjem, a potvrdili proračunom (Slika 5.). Nakon ugradnje regulatora, a prije priključenja novih potrošača provedenim mjerenjem kvalitete električne energije na izlazu iz regulatora izlazni napon je bio u dozvoljenim granicama što potvrđuju i izvršeni proračuni (Slika 6. - proračun i Slika 7. - mjerenje) osim dugotrajnih flikera što je posljedica slabe mreže.

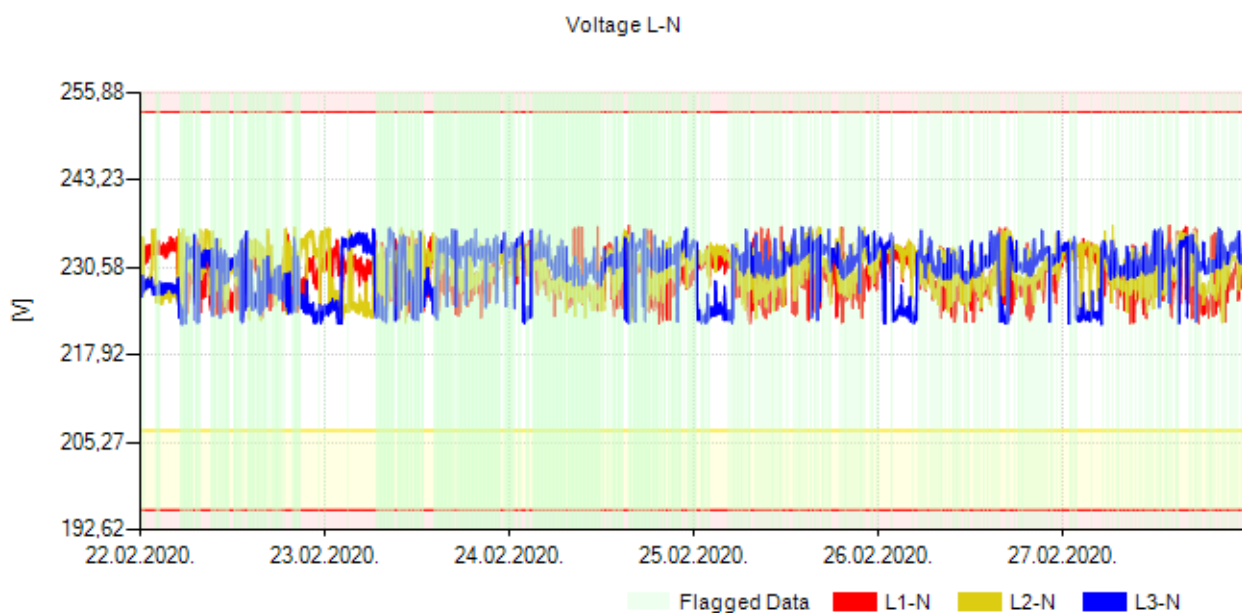


Slika 8. Proračun pada napona nakon priključenja novih potrošača s isključenim regulatorom (BYPASS MODE)

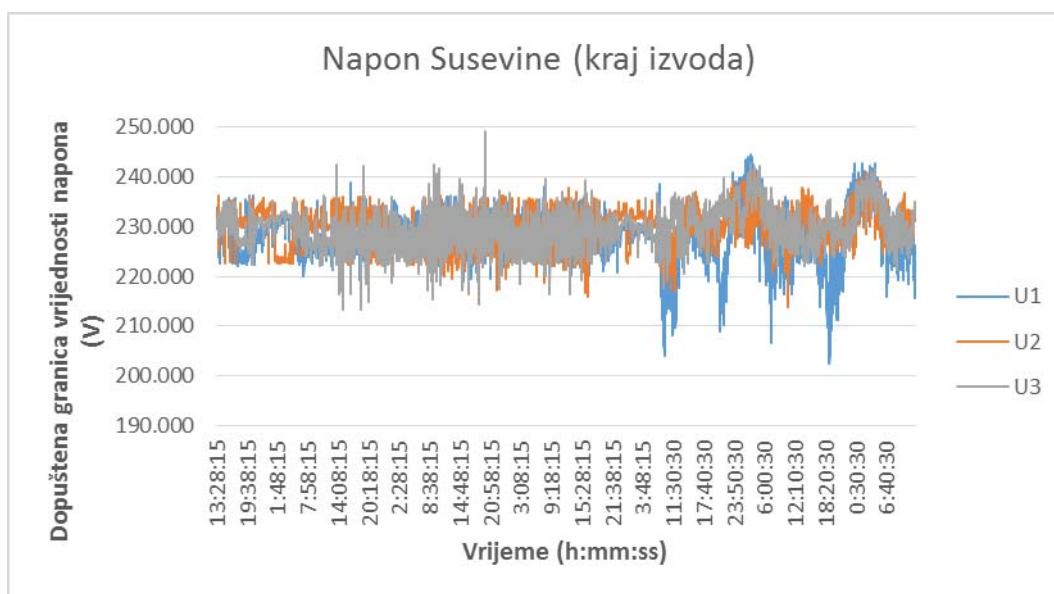


Slika 9. Proračun pada napona nakon priključenja novih potrošača s uključenim regulatorom

Proračunom kada je regulator u bypass modu (isključen regulator) padovi napona na kraju mreže bili bi 50% dok je napon na kraju mreže i na samom regulatoru napona blizu postavljene vrijednosti kada je regulator uključen (proračunati pad napona do 7,5%).



Slika 10. Trend faznog napona na izlazu iz regulatora nakon priključenja novih potrošača



Slika 11. Napon na kraju niskonaponske mreže u vikend naselju Suševine

Nakon izgradnje nove niskonaponske mreže i priključenja novih potrošača provedeno je mjerenje kvalitete električne energije i utvrđeno je sljedeće: izlazni napon iz regulatora je na podešenoj vrijednosti (Slika 10.), napon na kraju nove niskonaponske mreže je također u dozvoljenim granicama (Slika 11.), međutim vidljivi su propadi napona koji se događaju prilikom uključanja trošila velikih snaga. Isto tako kao i prije priključenja novih potrošača dugotrajni flikeri su iznad dopuštenih kao i naponska nesimetrija.

Ugradnjom regulatora napona na vikend naselju Suševine zadržali smo napon u propisanim granicama, te smo omogućili priključenje novih potrošača. Trenutno je priključeno 9 potrošača, a u planu je priključenje još 4 potrošača. Flikere i naponsku nesimetriju nismo uspjeli regulirati regulatorom napona, stoga će se u budućnosti planirati izgradnja transformatorske stanice kako bi se omogućilo priključenje većeg broja potrošača, a regulator napona ćemo koristiti za druge lokacije na kojima napon nije u dozvoljenim granicama.

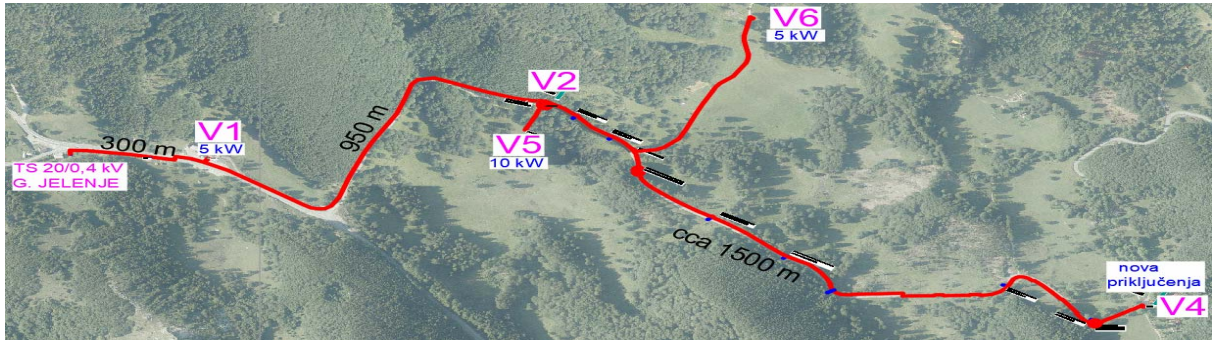


### 3. ISKUSTVA ELEKTROPRIMORJA PRI UVOĐENJU REGULATORA NAPONA

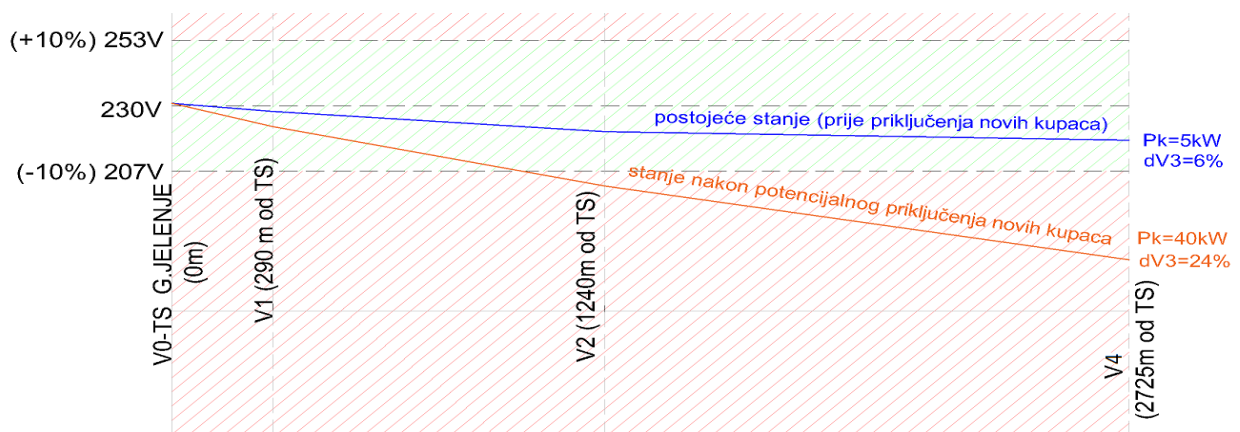
#### 3.1. Lokacija ugradnje

Regulator napona ugrađen je u dugom NN strujnom krugu (do 3000 m) napajanom iz TS G. Jelenje gdje se pojavila potreba za priključenjem većeg broja potrošača u naselju Lepenice na samom kraju mreže, a manjim dijelom i uzduž voda.

Iz dijagrama na Slici 14. koji prikazuje pad napona po duljini voda vidljivo je da bi priključenje kupaca uzrokovalo previsoke padove napona u mreži.

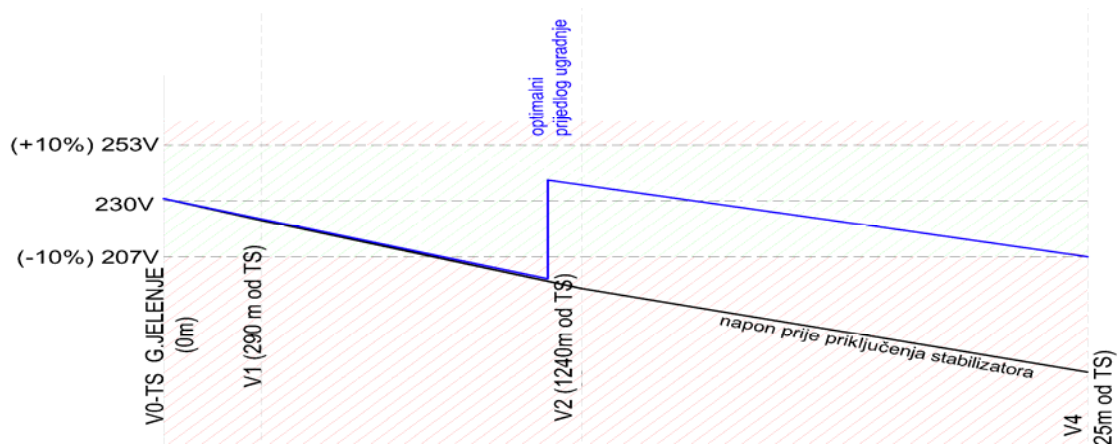


Slika 13. Prostorna situacija NN strujnog kruga napajanog iz TS Jelenje



Slika 14. Naponski dijagram NN strujnog kruga napajanog iz TS Jelenje

Na temelju algoritma napisanog za potrebe optimizacije pozicije regulatora sa ciljem maksimalnog mogućeg priključenja snage u naselju Lepenice odabrana je optimalna pozicija ugradnje. Regulator je ugrađen neposredno prije čvora V2 na Slikama 13. i 14. Naponski dijagram na Slici 15. prikazuje očekivano ponašanje regulatora u slučaju priključenja većeg broja potrošača na kraju mreže.

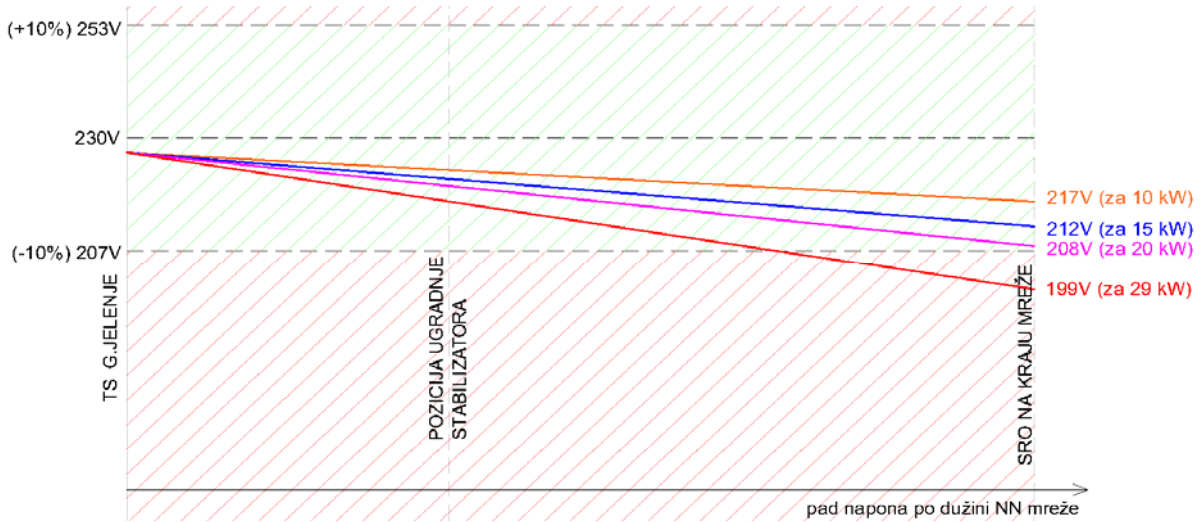


Slika 15. Naponski dijagram za dva optimalna rješenja ugradnje regulatora

### 3.2. Pokusna mjerenja – ponašanje regulatora napona u stvarnoj mreži

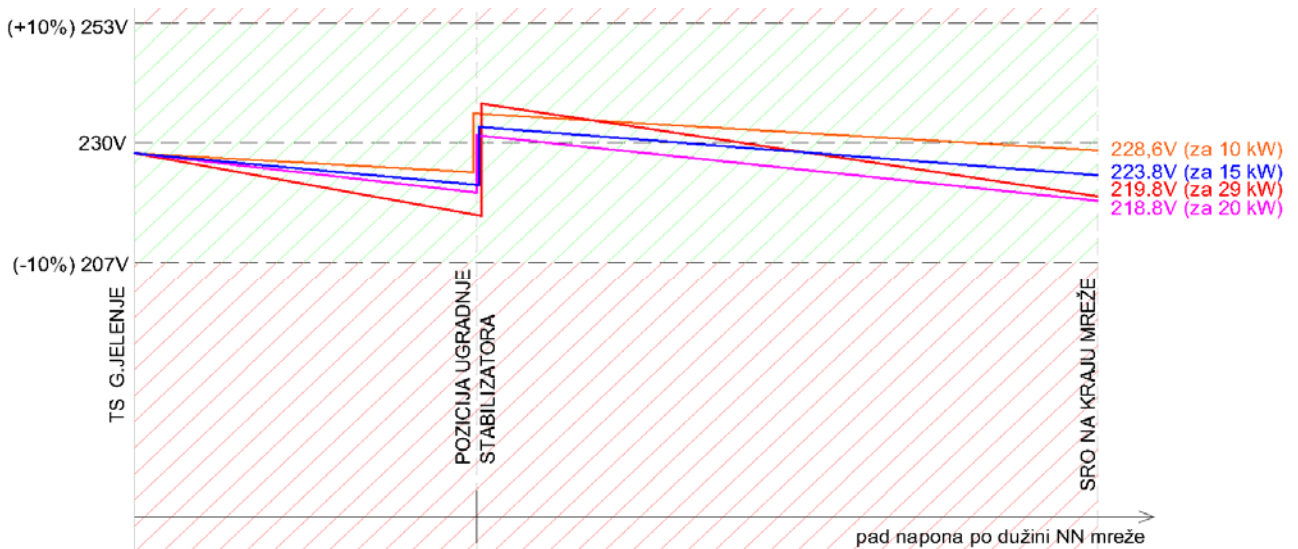
Obzirom da u trenutku pisanja rada još uvijek nije priključen veći broj potrošača kao i da su periodi najveće potrošnje kada je mreža najopterećenija po pitanju padova napona nepredvidivi, pokusna mjerenja izvršena su priključenjem potrošača na kraju mreže.

U NN mreži napajanoj AI150 kabelom na kraju mreže (cca 3000 m od TS) priključili smo četiri trofazna grijača i postupno povećavali potrošnju prvo u BYPASS modu, a onda s uključenim regulatorom u CONTROL mode-u.



Slika 16. Naponski dijagram sa regulatorom u BYPASS modu

Na Slici 16. prikazano je ponašanje napona uzduž voda s regulatorom u BYPASS modu gdje je reguliranje napona isključeno. Povećavanjem potrošnje u SRO-u na kraju mreže od 10 kW do 29 kW fazni napon sve više pada. Za 29 kW na kraju mreže pada sve do 199V (14%) što spada u nedozvoljeni napon.



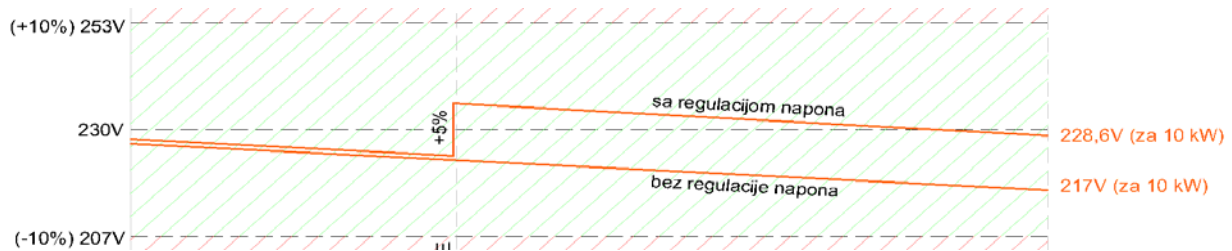
Slika 17. Naponski dijagram sa regulatorom u CONTROL modu

Na Slici 17. prikazano je ponašanje napona uzduž voda sa regulatorom u CONTROL modu gdje je reguliranje napona uključeno. Povećavanjem potrošnje od 10 do 29 kW regulator reagira i vrši regulaciju napona:

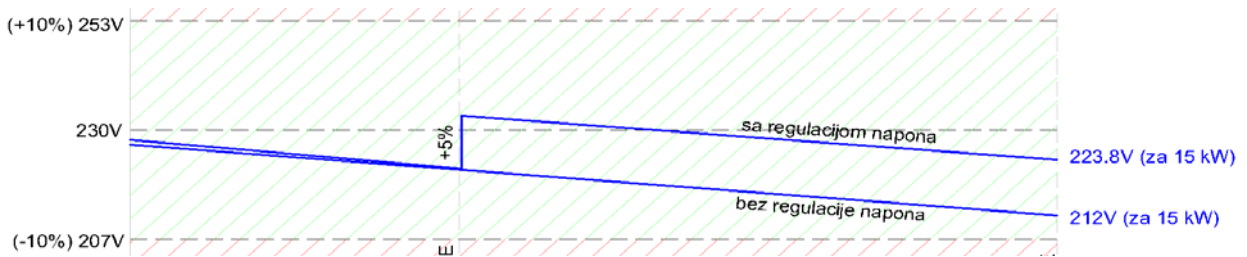
- Za 10 kW regulator podiže napon sekundara za 5%
- Za 15 kW korak podizanja napona i dalje ostaje na 5%
- Za 20 kW korak podizanja napona i dalje ostaje na 5%
- Za 29 kW regulator korak regulacije prebacuje na 10%

Vidljivo je kako bi se snagu na kraju mreže moglo i dodatno povećati te bi napon i dalje bio unutar propisanih granica.

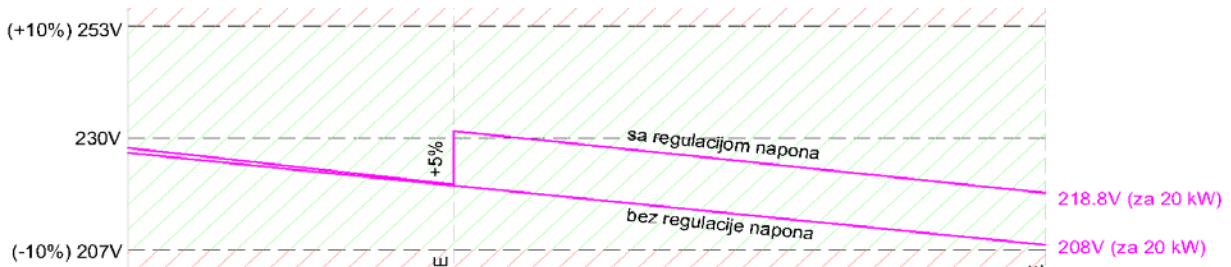
Na Slikama 18.-21. još su jednom prikazani izmjereni padovi napona bez regulacije i sa regulacijom za postupno podizanje snage od 10kW do 29 kW.



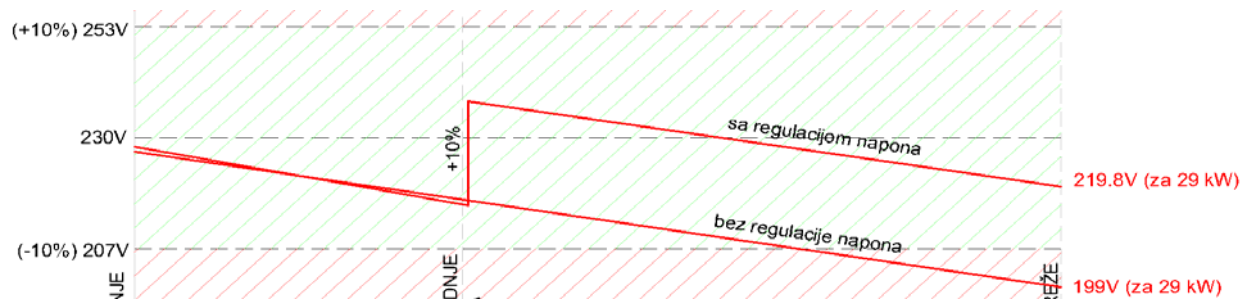
Slika 18. Pad napona bez i sa regulacijom za priključenu snagu od 10 kW na kraju mreže



Slika 19. Pad napona bez i sa regulacijom za priključenu snagu od 15 kW na kraju mreže



Slika 20. Pad napona bez i sa regulacijom za priključenu snagu od 20 kW na kraju mreže

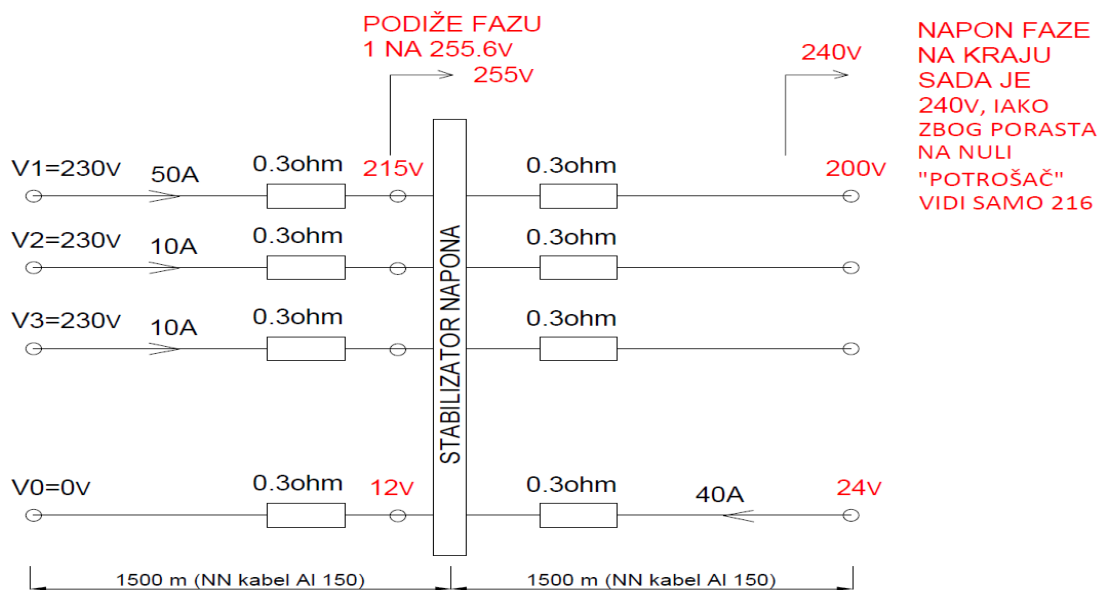


Slika 21. Pad napona bez i sa regulacijom za priključenu snagu od 29 kW na kraju mreže

### 3.3. Iskustvo – nesimetrija potrošača

Prilikom ugradnje regulatora napona na dugačkim NN vodovima posebnu pozornost treba posvetiti simetriranju potrošača, pogotovo u slučajevima kada se regulator napona priključuje u sredini mreže, a ne na kraju. Naime, u slučaju preopterećenja jedne faze moguće je da regulator za tu fazu izvrši sanaciju napona. No u tom slučaju kroz nul vodič bi se i dalje uslijed nesimetrije vraćao relativno veliki iznos struje. Obzirom na duljinu mreže u tom bi slučaju moglo doći do značajnog porasta napona na nul vodiču što bi uzrokovalo dodatno značajno pogoršanje naponskih prilika i u preostalim fazama koje ni regulator napona ne bi mogao riješiti.

U primjeru sa Slike 22. vidljivo je kako uslijed porasta napona na nul vodiču regulator napona vrši regulaciju faze 1. Za preostale faze moglo bi se dogoditi da regulator napona smatra kako su naponi preostalih faza dovoljno dobri i blizu vrijednosti nazivnog napona (npr. 225 V) iako bi u stvarnosti ti naponi bili sniženi za vrijednost napona na nul vodiču ( $225-24V=201V$ ).



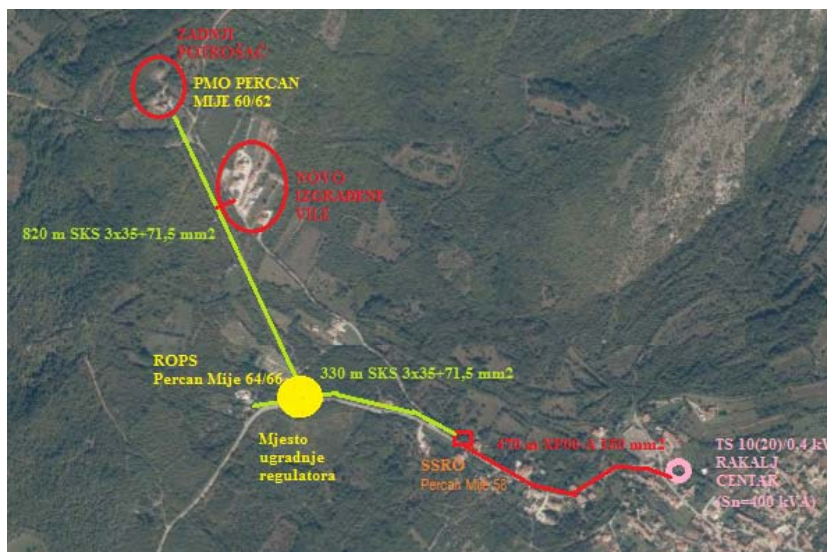
Slika 22. Primjer mogućeg problema uslijed nesimetrije potrošača

Iskustva Elektroprimorja pokazuju kako je regulatorom napona moguće priključiti relativno veliku snagu (30-40 kW) na dugačkom NN vodu i zadržati napon unutar propisanih granica. Pritom kod dugačkih vodova posebnu pozornost treba posvetiti simetriranju faza.

#### 4. ISKUSTVA ELEKTROISTRE PRI UVOĐENJU REGULATORA NAPONA

Radi ugradnje i testiranja nove tehnologije regulatora napona Elektroistra je odabrala specifičnu niskonaponsku mrežu u kojoj je bilo potrebno na razmatranom NN izvodu TS 10(20)/0,4 kV Rakalj Centar sanirati naponske prilike u kratkom vremenskom intervalu. Naime, u predmetnoj NN mreži TS 10(20)/0,4 kV Rakalj Centar je pri kraju razmatranog NN izvoda priključeno nekoliko vila pretežito turističke namjene te izrazito velikog faktora istovremenosti. Stoga je za navedenu mrežu tijekom turističke sezone zaprimljen veći broj pritužbi na kvalitetu napona.

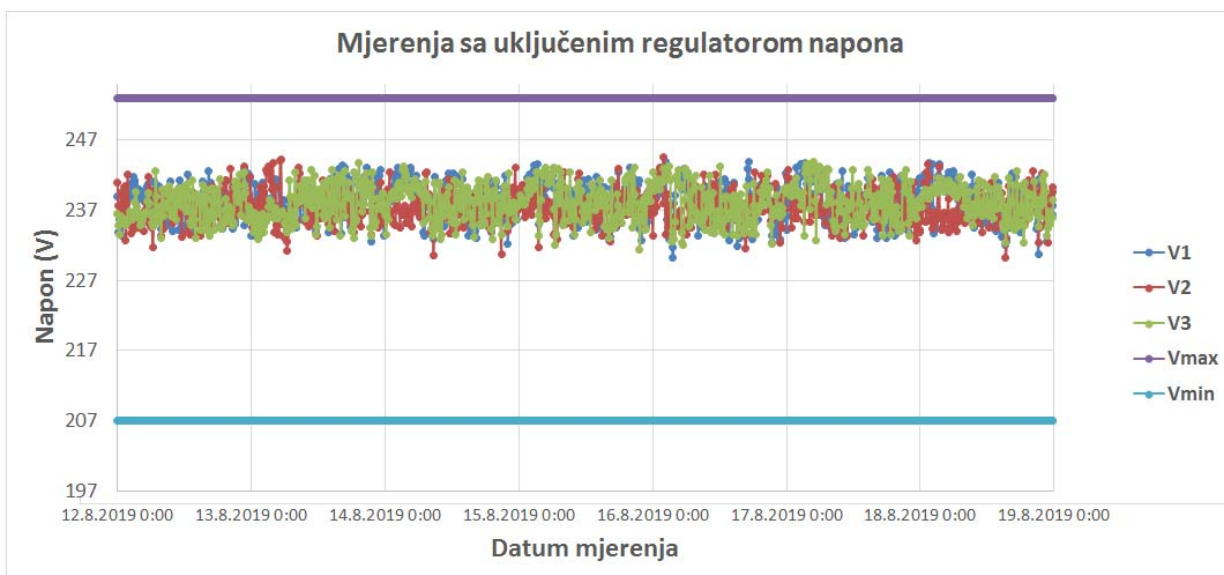
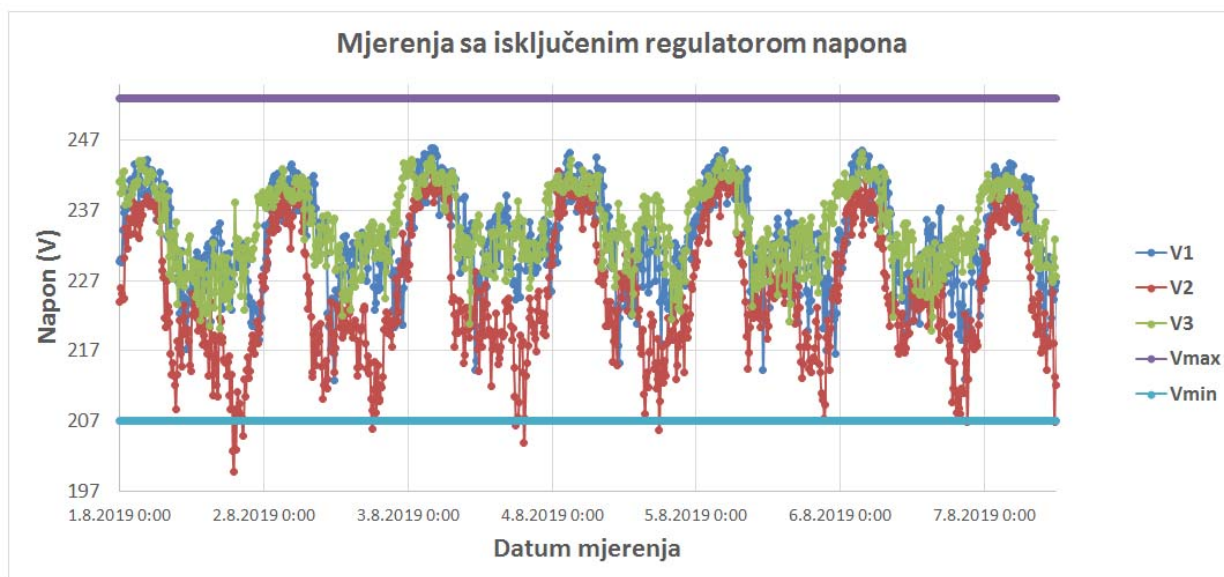
Kontrolnim 7 dnevnim mjerenjima utvrđeni su u udaljenim dijelovima mreže najniže vrijednosti napona u pojedinim fazama u iznosima od 184 V do 205 V što je ispod dozvoljenog odstupanja od  $\pm 10\%$   $U_n$  (207 - 253 V). Time je ujedno pokazano da su pritužbe kupaca bile opravdane. Prva faza sanacije naponskih prilika provela se kabliranjem prvog djela mreža do SSRO-a Percan Mije 58 kabelom XP00-A 4x150 mm<sup>2</sup>, a druga faza obuhvaćala je ugradnju regulatora napona u blizini ROPS-a Percan Mije 64/66. Pojednostavljeni grafički prikaz NN izvoda i tehničkih karakteristika mreže prikazan je na Slici 13.



Slika 23. Pojednostavljeni prikaz NN izvoda i mjesta ugradnje regulatora napona u mreži TS 10(20)/0,4 kV Rakalj centar

Lokacija regulatora napona je odabrana sukladno proračunu tako da je u točki ugradnje proračunom utvrđeno da je napon u mreži manji od 207 V ( $-10\% \cdot U_n$ ). Nakon kraćeg testnog rada regulator napona je pušten u pogon sa slijedećim fiksnim podešenjima:  $U_{set}=240$  V,  $U_n=1,02 \cdot U_{set}$ ,  $U_l=0,95 \cdot U_{set}$  te  $k=20$  V/s. Navedeno označava da je ciljani napon u točki u kojoj djeluje regulator napona u promatranom NN izvodu u iznosu od 240 V, uz dozvoljeno odstupanje od 228 V do 244.8 V. Ciljani napon i granice utvrđene su proračunima, a gornje podešenje je ograničeno na 244.8 V iz razloga jer u mreži postoje stare instalacije koje su predviđene za fazni napon od 220 V. Dodatno, regulator djeluje pri promjenama većim od 20 V po sekundi. Iskustveno je pokazano da za razmatranu mrežu obzirom na karakter potrošnje smanjenje koeficijenta  $k$  dovodi do nepotrebno velikog broja promjena položaja regulatora koje ne uzrokuju značajno poboljšanje u naponskim prilikama razmatrane NN mreže.

Testiranje efikasnosti regulatora napona u sanaciji naponskih prilika provelo se tako da je regulator napona bio 7 dana isključen, odnosno 7 dana uključen sa gore navedenim podešenjima u razdoblju od 01.08.2019. do 18.08.2019. (sa nekoliko dana pauze). Rezultati preuzeti iz regulatora napona (na mjestu ugradnje) sa uključenim i isključenim regulatorom prikazani su na Slici 14.



Slika 24. Naponske prilike na mjestu ugradnje regulatora sa i bez isključenja regulatora

Sukladno Slici 24. vidljivo je da je za vrijeme dok je regulator napona bio isključen napon varirao u nedozvoljenom području od 193,5 V do 245,9 V, a nakon uključenja napon se kretao od 230,2 V do 244 V. Kretanje tereta kroz sam regulator za vrijeme isključenog regulatora bilo je od 3,3 kVA do 24,7 kVA, a za vrijeme uključenog od 3,7 kVA do 25,8 kVA. Stoga se može zaključiti da je regulator napona sukladno danim postavkama uspješno sanirao naponske prilike u razmatranom NN izvodu, te značajno smanjio nesimetriju napona na izlazu iz regulatora.

Važno je naglasiti da pri primjeni regulatora napona posebno u zračnim mrežama važno je voditi računa o kriteriju dosega zaštite u NN mreži prilikom odabira snage regulatora napona. Za konkretno razmatrani NN izvod izračunata minimalna struja jednopolnog kratkog spoja na najudaljenijoj točki, odnosno na PMO Percan Mije 60/62 je u iznosu od 103 A. Stoga, uz uporabu prekidača, a prema "Pravilniku o tehničkim normativima za zaštitu niskonaponskih mreža i pripadnih transformatorskih stanica" najveći prekidač nazivne struje od 68 A (103/1,5) smije biti korišten prilikom šticećenja navedenog dijela NN izvoda ukoliko se dodatno ne stupnjuje zaštita (što nije zgodno za izvesti u konkretnom primjeru). Samim time odabrani regulator napona nazivne snage od 70 kVA (100 A) za konkretnu primjenu je prevelikog iznosa jer kriteriji dosega zaštite ograničava i snagu koju može navedeni regulator predati u NN mrežu.

## **5. ZAKLJUČAK**

Regulator napona predstavlja alternativu ili privremenu odgodu izgradnji nove transformatorske stanice zbog mogućnosti brze instalacije, manjih zahvata u mreži i relativne ekonomske opravdanosti. Također, nakon izgradnje transformatorske stanice uređaj je moguće preseliti na drugu lokaciju na kojoj je potrebno sanirati naponske prilike.

U distribucijskim područjima Elektroslavonija Osijek, Elektroprimorje Rijeka i Elektroista Pula regulator napona je ugrađen na dugim niskonaponskim vodovima gdje je uslijed prevelike udaljenosti od transformatorske stanice pad napona na kraju voda veći od dozvoljenih 10 %. Usporedbom rezultata mjerenja kvalitete napona prije i poslije ugradnje regulatora napona može se zaključiti da su se naponske prilike poboljšale te se iznos napona sveo unutar granica propisanih normom HRN EN 50160. Ostali parametri kvalitete napona poput flikera i nesimetrije u pojedinim distribucijskim područjima nisu zadovoljili zahtjeve prema HRN EN 50160.

## LITERATURA

- [1] HRN EN 50160:2012 - Naponske karakteristike električne energije iz javnih distribucijskih mreža
- [2] Uvjeti kvalitete opskrbe električnom energijom (NN 37/17, 47/17, 31/18)
- [3] A. Višić, R. Ćućić, K. Vlahov, I. Dundović - Uvođenje uređaja za poboljšanje naponskih prilika u niskonaponskim mrežama, HO CIRED 6.(12.) savjetovanje, Opatija (13.-16. svibnja 2018.)
- [4] V. Komen, A. Pavić, R. Ćućić - Moguća tehnička rješenja za sanaciju naponskih prilika u niskonaponskim mrežama, HO CIRED 2.(8.) savjetovanje, Umag (16.-19. svibnja 2010.)
- [5] Nino Vrandečić, Mario Pisačić, Ante Šoštarić, Vladimir Čolić, Josip Klinc – Poboljšanje naponskih prilika uporabom regulatora napona u vikend naselju Suševine, 14. savjetovanje HRO CIGRE, Šibenik (10. – 13. prosinca 2019.)