

UNIVERZITET CRNE GORE  
ELEKTROTEHNIČKI FAKULTET



MILICA ĐUKIĆ

**ANALIZA UTICAJNIH FAKTORA NA VRIJEDNOSTI  
IZNESENIH POTENCIJALA IZ VISOKONAPONSKIH  
RAZVODNIH POSTROJENJA**

MASTER RAD

Podgorica, 2024. godine

## **PODACI I INFORMACIJE O STUDENTU**

**Ime i prezime:** Milica Đukić

**Datum i mjesto rođenja:** 06.07.1999. godine, Podgorica, Crna Gora

**Naziv završenog osnovnog studijskog programa i godina završetka studija:** Energetika i automatika, 2022. godine

## **INFORMACIJE O MASTER RADU**

**Naziv master studija:** Elektroenergetski sistemi

**Naslov rada:** Analiza uticajnih faktora na vrijednosti iznesenih potencijala iz visokonaponskih razvdonih postrojenja

**Fakultet na kojem je rad odbranjen:** Elektrotehnički fakultet

## **UDK, OCJENA I ODBRANA MASTER RADA**

**Datum prijave master rada:** 27.05.2024. godine

**Datum sjednice Vijeća na kojoj je prihvaćena tema:** 16.09.2024. godine

**Mentor:** Prof. dr Vladan Rđulović

**Komisija za ocjenu/odbranu rada:**

1. Prof. dr Martin Ćalasan
2. Prof. dr Vladan Radulović
3. Doc. dr Snežana Vujošević

Datum odbrane: 30.10.2024. godine

Datum promocije: \_\_\_\_\_

Ime i prezime autora: Milica Đukić, BSc

## ETIČKA IZJAVA

U skladu sa članom 22 Zakona o akademskom integritetu i članom 18 Pravila studiranja na master studijama, pod krivičnom i materijalnom odgovornošću, izjavljujem da je master rad pod naslovom

"Analiza uticajnih faktora na vrijednosti iznesenih potencijala iz visokonaponskih razvodnih postrojenja"

moje originalno djelo.

Podnositelj izjave,

Milica Đukić, BSc



U Podgorici, dana 26.09.2024. god.

*Ovom prilikom se zahvaljujem svom mentoru prof. dr Vladanu Raduloviću na ukazanoj pomoći, korisnim savjetima i ličnom angažovanju pri formulisanju teme ovog rada i pisanju istog.*

*Posebno se zahvaljujem svojoj porodici, kao najčvršćem osloncu i podršci.*

*Milica Đukić*

## Apstrakt

Izneseni naponi (odnosno izneseni potencijali, u odnosu na nulli referentni potencijal zemlje) predstavljaju napone koji se iznose iz postrojenja različitim provodnim putevima, usled dolaska uzemljivača postrojenja na nenultu vrijednost napona. Pomenuti naponi mogu predstavljati opasnost od strujnog udara po ljude unutar tog i susjednih visokonaponskih razvodnih postrojenja ili njihove okoline. Kao glavni motiv analize uticaja različitih faktora na iznesene napone se izdvaja bezbjednosni aspekt. Bezbjednost ljudi je narušena, ukoliko izneseni naponi izazovu napone dodira i koraka takve da njihove vrijednosti izlaze iz dozvoljenih okvira. Tada se pribjegava različitim propisanim korektivnim akcijama (na pr. promjeni podešenja uređaja relejne zaštite, korekciji projekta uzemljenja, ograničenju struje zemljospoja). Pomenuti naponi dodira i koraka se, u problemu iznesenih napona, odnose na postrojenja susjednim postrojenju pogodjenim kvarom.

U ovom radu analiziran je kvantitativni uticaj pojedinačnih faktora, kao i određeni slučajevi njihovog kombinovanog uticaja, na vrijednosti iznesenih napona do jedne ili više susjednih trafostanica. Uticajni faktori su: dužine vodova, ukupan broj vodova, odnos broja kablovskeih i nadzemnih vodova, broj raspona, broj dionica, naponski nivo, temperatura okoline, broj žila kabla, specifična električna otpornost zemljišta, materijali elemenata kojima se iznose naponi, nulta komponenta struje kvara, impedansa trafostanice pogodene kvarom, impedansa susjednih trafostanica, prisustvo armature kablova, konstruktivne karakteristike armature i sl. Uticajni faktor koji se izdvaja jeste konfiguracija priključnih vodova postrojenja, čija je analiza dala zaključke o uticaju ukupnog broja vodova na izneseni napon i zaključke o uticaju odnosa broja nadzemnih i kablovskeih vodova na iste. Matematički proračun počiva na jednačinama telegrafičara, modelu zaštitnog užeta nadzemnog voda (sastavljenog iz kaskadne veze „ $\pi$ “ šema) i modelu metalnog plašta, električne zaštite i armature kablovskog voda sa neprovodnim spoljnim omotačem (sastavljenog iz kaskadne veze „T“ šema). Ishod istraživačkog rada je i program koji omogućava praćenje svih iznesenih napona iz postrojenja za određeni kvar, vrijednosti uticajnih parametara i proizvoljno uklopno stanje. Na pomenuti program se nadovezuje korisnički grafički interfejs koji korisnicima omogućava unošenje svih pomenutih parametara u cilju dobijanja iznesenih napona.

**Ključne riječi:** izneseni naponi, koeficijent iznesenog potencijala, redukcioni faktor, zaštitno uže nadzemnog voda, metalne zaštite kablovskog voda

## Abstract

Transferred voltages (that is, the transferred potentials, relative to the zero reference potential of the earth) represent the voltages that are transferred from the switchyard through various conductive paths due to the grounding system of the switchyard reaching a non-zero voltage value. These voltages can pose a risk of electric shock to people within that high-voltage switchyard and nearby high-voltage switchyards or their surroundings. The primary motive for analyzing the impact of various factors on transferred voltages is the safety aspect. Human safety is compromised if the transferred voltages cause touch and step voltages to exceed the permitted limits. In such cases, different prescribed corrective actions are taken (e.g. changing the settings of relay protection devices, correcting the grounding design, limiting ground fault currents). The mentioned touch and step voltages, in the problem of transferred voltages, refer to switchyards adjacent to the fault-affected switchyard.

This paper analyzes the quantitative impact of individual factors, as well as certain cases of their combined influence, on the values of transferred voltages to one or more adjacent switchyards. The influencing factors include: line lengths, total number of lines, the ratio of cable to overhead lines, the number of spans, the number of sections, voltage level, ambient temperature, the number of cable cores, soil electrical resistivity, materials of the elements through which the voltages are transferred, zero-sequence fault current, impedance of the fault-affected switchyard, impedance of neighboring switchyards, the presence of cable armor, structural characteristics of the armor, etc. The influencing factor that stands out is the configuration of the switchyard's connection lines, whose analysis provided conclusions about the impact of the total number of lines on the transferred voltage and the impact of the ratio of overhead to cable lines on the same. The mathematical calculation is based on the telegrapher's equations, the overhead line shield wire model (composed of a cascaded connection of "π" schemes) and the model of the metallic sheath, electrical shielding, and cable armor with a non-conductive outer jacket (composed of a cascaded connection of "T" schemes). The outcome of the research work is also a program that enables monitoring of all transferred voltages from the switchyard for a specific fault, values of influencing parameters, and any arbitrary switching state. The program is complemented by a Graphical User Interface that allows users to input all the mentioned parameters to obtain the transferred voltages.

**Key words:** transferred voltages, coefficient of transferred voltages, reduction factor, overhead ground wire, metallic shielding of cable lines

## **Sadržaj**

|   |     |
|---|-----|
| 1. Uvod.....  | 1   |
| 2. Postojeća istraživanja.....  | 3   |
| 3. Uzemljenje u visokonaponskim razvodnim postrojenjima.....                            | 5   |
| 3.1 Uloga, tipovi i elementi visokonaponskog razvodnog postrojenja.....                 | 5   |
| 3.2 Veze između postrojenja.....  | 7   |
| 3.3 Uzemljenje postrojenja .....  | 7   |
| 3.4 Opis i tipovi kvarova u postrojenju.....  | 11  |
| 4. Izneseni potencijal .....  | 15  |
| 4.1 Definicija i način nastanka iznesenog potencijala .....                             | 15  |
| 4.2 Posledice iznesenog potencijala i mjere za njegovo sniženje.....                    | 16  |
| 4.3 Zaštita od strujnog udara.....  | 19  |
| 5. Modelovanje i matematički proračun iznesenog potencijala.....                        | 25  |
| 5.1 Jednačine telegrafičara.....  | 25  |
| 5.2 Redukcioni faktor nadzemnog voda .....  | 30  |
| 5.3 Koeficijent iznesenog potencijala nadzemnog voda.....                               | 34  |
| 5.4 Ukupna impedansa zaštitnog užeta.....   | 37  |
| 5.5 Redukcioni faktor kablovskog voda .....   | 38  |
| 5.6 Koeficijent iznesenog potencijala kablovskog voda.....                              | 43  |
| 5.7 Ukupna impedansa metalnih zaštita kabla.....  | 46  |
| 5.8 Napon uzemljivača postrojenja pogodenog kvarom i izneseni naponi.....               | 46  |
| 6. Proračun iznesenog potencijala i analiza rezultata .....                             | 49  |
| 6.1 Koeficijent iznesenog potencijala i redukciona faktor nadzemnog voda .....          | 49  |
| 6.2 Koeficijent iznesenog potencijala i redukciona faktor kablovskog voda .....         | 50  |
| 6.3 Analiza uticajnih faktora na iznesene napone nadzemnim vodovima .....               | 52  |
| 6.4 Analiza uticajnih faktora na iznesene napone kablovskim vodovima .....              | 68  |
| 6.5 Graphical User Interface i analiza uticaja uklopnog stanja na iznesene napone ..... | 94  |
| 7. Zaključak .....  | 104 |
| Literatura.....   | 106 |

## 1. Uvod

Kao izuzetno važno pitanje u elektroenergetici, ističe se pitanje bezbjednosti osoblja u postrojenju i njegovoj okolini. Postrojenje mora biti bezbjedno po osoblje i opremu u normalnom radnom pogonu, ali i u slučajevima narušenog sigurnog radnog režima. Sigurnosni aspekti moraju biti zadovoljeni za najteže slučajeve kvarova, kakvi su kratki spojevi unutar samog visokonaponskog razvodnog postrojenja (VNRP-a). Kvarovi mogu dovesti do pojave opasnih napona u postrojenju pogodenim kvarom i/ili u susjednim postrojenjima. Naponi koji se javljaju u susjednim postrojenjima nazivaju se izneseni naponi (odnosno izneseni potencijali, u odnosu na referentni nulti potencijal zemlje<sup>1</sup>). Ti naponi mogu biti opasni po osoblje koje se nalazi u okviru susjednih trafostanica (TS-a), kada izazivaju napone dodira i koraka koji prelaze maksimalno dozvoljene vrijednosti.

Predmet ovog rada je individualni i kombinovani uticaj različitih faktora na iznesene napone. Prikazan je matematički proračun kojim se dobijaju izneseni naponi. Predmet istraživanja obuhvata sledeće faktore koji utiču na vrijednosti pomenutih napona nadzemnih vodova (NV-ova): konfiguracija mreže<sup>2</sup>, broj raspona NV-a, dužina jednog raspona, naponski nivo (35kV, 110 kV, 220kV i 400kV), ukupna dužina zaštitnog užeta, materijal zaštitnog užeta, ambijentalna temperatura, efektivna vrijednost impedanse susjednog postrojenja, specifična električna otpornost tla, nulta komponenta struje kvara i rezistansa uzemljenja TS-e pogodenog kvarom. Pored pomenutih, takođe je dat prikaz zavisnosti koeficijenta iznesenog potencijala od ukupne dužine NV-a i broja raspona, kao i redukcionog faktora od naponskog nivoa. Predmet istraživanja obuhvata sledeće faktore koji utiču na vrijednosti iznesenih napona kablovske vodove (KV-ova): konfiguracija mreže, broj dionica KV-a, dužina jedne dionice, naponski nivo (10kV i 35kV), ukupna dužina KV-a, materijal metalnog plašta, efektivne vrijednosti impedanse susjednih postrojenja, specifična električna otpornost tla, nulta komponenta struje kvara, broj žila kabla (jedna ili tri), prisustvo/odsustvo armature, materijal armature, broj armaturnih traka, korak uvijanja, debljina i širina armaturne trake i rezistansa uzemljenja TS-e pogodenog kvarom. Pored pomenutih, takođe je dat prikaz zavisnosti koeficijenta iznesenog potencijala od broja dionica KV-a i njegove ukupne dužine, kao i redukcionog faktora od broja žila i prisustva armature. Uticaji određenih faktora dati su pojedinačno, dok su neki uticaji na izneseni napon, dati objedinjeno.

Cilj rada je određivanje uticaja pomenutih faktora na napone koji se iznose svim NV-ovima i KV-ovima, koji polaze iz VNRP-a pogodenog kvarom. Istraživačka pitanja se odnose na kvantitet pomenutih uticaja. Rad počiva na determinističkoj metodi, tj. matematičkom proračunu, zasnovanom na diferencijalnim jednačinama, koje su korišćene za izračunavanje iznesenih napona. Elementi elektroenergetskog sistema (EES-a), i to zaštitna užad NV-ova i metalne zaštite KV-ova, modelovani su rednim vezama šema sa koncentrisanim parametrima. Primjena ovih modela omogućila je korišćenje jednačina telegrafičara u kompleksnom domenu za ograničene vodove. Zahvaljujući tome, moguće je odrediti koeficijente iznesenih potencijala vodova, njihove redukcione faktore i impedanse, napon uzemljivača i na kraju iznesene napone. Za provjeru rezultata, koji se odnose na proračun iznesenih napona u slučaju većeg broja NV-ova i većeg broj KV-ova, korišćen je softverski alat

---

<sup>1</sup> Referentna zemlja – udaljen dio zemlje od mjesta kvara, na čiji potencijal ne utiče odvođenje struje u zemlju (na mjestu kvara).

<sup>2</sup> Konfiguracija mreže – uklopno stanje postrojenja pogodenog kvarom, odnosno broj NV-ova i KV-ova koji su u pogonu.

Simulink (razvijen od strane kompanije MathWorks). Princip rada Simulink-a je numeričko rješavanje diferencijalnih jednačina, za razliku od proračuna korišćenog u ovom radu – gdje su rješenja diferencijalnih jednačina dobijena analitički. U MATLAB Graphical User Interface-u (GUI-u) je implementiran program kojim korisnik može da unosi broj i karakteristike NV-ova i/ili KV-ova, kao i određene karakteristike sredine. Kao rezultat se dobijaju efektivne vrijednosti iznesenih napona do svih posmatranih susjednih TS-a. Problem istraživačkog rada je kako postojeće proračune za NV i KV prilagoditi za slučaj većeg broja vodova različitog tipa. Hipoteza koja se postavlja jeste da se odabirom određenih vrijednosti uticajnih faktora i odabirom konfiguracije mreže može uticati na vrijednosti iznesenih napona. Praćenjem zakonitosti koje su dobijene u poglavlju rezultati i odabirom vrijednosti uticajnih parametara, za određeno uklopno stanje mreže – moguće je postići minimalne iznesene napone iz VNRP-a. Takođe, korišćenjem GUI-a, moguće je pratiti sve iznesene napone pri modifikaciji bilo kog uticajnog faktora, uključujući i uklopna stanja priključenih NV-ova i KV-ova.

Rad se sastoji od sedam poglavlja. U prvom poglavlju date su uvodne napomene o temi istraživanja i samom radu.

U drugom poglavlju predstavljeni su važni segmenti dosadašnjih istraživanja koji se odnose na proračune iznesenih potencijala. Takođe, predviđeni su predlozi za nastavak istraživačkog rada.

U trećem poglavlju su opisani elementi VNRP-a, električne veze između postrojenja (tj. zaštitno uže NV-a, električna zaštita, metalni plašt i armatura KV-a). Opisano je uzemljenje, njegova podjela, način izvedbe i značaj u temi koja se obrađuje u radu. Na samom kraju poglavlja, opisani su kvarovi u postrojenju i posledice koje oni donose.

U četvrtom poglavlju je opisan pojam, način nastanka i posledice iznesenog potencijala. Objašnjen je i pojam strujnog udara, kao i zaštita od istog.

U petom poglavlju je prikazan matematički postupak za izračunavanje koeficijenata iznesenih potencijala i redukcionih faktora NV-ova i KV-ova, njihovih impedansi, napona uzemljivača i iznesenih napona.

U šestom poglavlju je dat pregled rezultata dobijenih iz urađenog MATLAB programa. Rezultati obuhvataju individualne i kombinovane uticaje različitih faktora na efektivne vrijednosti iznesenih napona. Takođe, dat je uticaj određenih faktora na vrijednosti koeficijenata iznesenih potencijala i vrijednosti redukcionih faktora. Prikazane su i promjene koje, u iznesenim naponima, stvara promjena uklopног stanja, tačnije promjena ukupnog broja vodova i promjena odnosa broja NV-ova i KV-ova. U ovom poglavlju nalazi se prikaz reprezentativnih prozora GUI-a.

U sedmom poglavlju su izvedeni opšti zaključci o individualnom i kombinovanom uticaju određenih faktora na vrijednosti iznesenih napona.

## 2. Postojeća istraživanja

U dosadašnjim istraživanjima izneseni naponi (odnosno izneseni potencijali, u odnosu na referentni nulti potencijal zemlje) su izučavani, uglavnom, u slučaju jednog ili dva voda koji polaze iz jednog VNRP-a. Izneseni napon predstavlja algebarsku razliku odgovarajućeg iznesenog potencijala i referentnog potencijala zemlje nulte vrijednosti. Oni su neželjena pojava koja prati kvarove ka zemlji u postrojenju. Mogu se, u manjoj ili višoj mjeri, iznijeti iz VNRP-a pogodenog kvarom. Opis, definicija i podjeli postrojenja opisane su u [2]. Pomenuti teorijski uvid važan je iz razloga što postrojenje predstavlja elektroenergetski objekat na čijim elementima se događa kvar i odakle se iznose naponi do susjednih postrojenja. Elektroenergetski elementi glavnih strujnih krugova (kao što su sabirnice, prekidači, rastavljači i slično) su detaljno opisani u [3]. Sistem uzemljenja je jedan od najvažnijih pojmljiva u obradi ove teme, s obzirom na to da se naponi iznose uzemljenum zaštitnim užadima NV-ova i uzemljenum metalnim zaštitama KV-ova. Pojam uzemljenja, podjeli, elementi, kao i njegova uloga su objašnjeni u [4], [5] i [6]. U [6] se nalaze i neki od načina smanjenja iznesenih napona. Značaj uzemljenja je višestruk i njegova uloga u funkcionalisanju relejne zaštite je opisana u [8]. Pomenuti aspekt važan je kako bi se, uz osjetljivo i selektivno djelovanje zaštitnih uređaja, kvarovi brzo otklonili i tako smanjili ili spriječili iznošenje opasnih napona iz VNRP-a. Praćenje veličina koje su od interesa za redukovanje kvarova sa zemljom zavise, između ostalog, od načina uzemljenja neutralne tačke mreže. Ti načini, njihove prednosti i mane, su predočeni i objašnjeni u [9], [10] i [11]. Na iznesene napone utiču mnogi faktori. Jedan od takvih je specifična električna otpornost različitih vrsta tla, čije vrijednosti su date u [12], kao i načini postavljanja uzemljivača. Takođe, ovim materijalom predočene su glavne tehničke norme koje uzemljenje mora zadovoljiti. U [13] i [14] su objašnjeni glavni uticajni faktori, iz tehničke i sigurnosne tačke gledišta, koji se uvažavaju pri projektovanju sistema uzemljenja VNRP-a. Detalji o načinu dimenzionisanja uzemljenja dati su u [18], [19] i [20]. Kvantitet iznesenih napona, između ostalog, zavisi od kvaliteta uzemljenja, ali i od inteziteta kvara. Opis nastanka, tipovi i posledice različitih kvarova koji se događaju u EES-u su, dijelom, opisani u [22–24]. Nakon što su definisane informacije od interesa vezane za postrojenja, uzemljenje i kvarove, stiču se uslovi za definiciju iznesenih potencijala, koja je data u [26]. Tu se nalazi razrađen matematički proračun veličina od interesa, i to: redukcionih faktora NV-ova i KV-ova, koeficijenata iznesenih potencijala NV-ova i KV-ova, ukupne impedanse zaštitnog užeta NV i metalne zaštite KV, napona uzemljivača postrojenja pogodenog kvarom i na kraju iznesenih napona. Kvarovi koji se dešavaju unutar VNRP-a i/ili njegove okoline izazivaju pojavu napona na površinskom sloju tla (napone koraka), odnosno pojavu napona na metalnim djelovima postrojenja koji, u normalnom pogonu, nisu pod naponom (naponi dodira). Raspodjela razlike potencijala dodira i koraka je, takođe, data u [26]. Generalno, rizici i opasnosti usled iznošenja opasnih napona su predočeni u [29–32]. Definicije i posledice opasnih napona dodira i koraka, kao i odgovarajuće zamjenske šeme dati su u [34–36]. Tu, kao i u [37], su predočeni parametri od kojih zavise, različite zakonitosti kojima podliježu, metodologije njihovog praćenja, kao i opsezi vrijednosti u kojima se srijeću. Cilj je svesti iznesene napone na što niže vrijednosti, koje će biti bezbjedne, bez narušavanja normalnog sigurnog radnog režima i potreba konzuma. Nebezbjedni izneseni naponi mogu izazvati strujni udar. Upravo kontrola iznesenih napona, u uslovima kvara, predstavlja jednu od prevencija strujnog udara. Međutim, kako je važno poznavanje svih preventivnih mjera za sprečavanje izlaganja strujnom udaru, kao i akcija koje se proceduralno sprovode ukoliko do njega ipak dođe. Opis dejstva

električnog udara na ljudski organizam, kao i zaštita od istog, opisani su u [39–42]. Bitan ulazni parametar za razumjevanje ovog problema je impedansa ljudskog tijela, koja je razmotrena u [43] i [44]. U [44–48] opisano je dejstvo jednosmjerne i naizmjenične struje na čovjeka. Glavni aspekti zaštite od strujnog udara dodatno su predviđeni u [49] i [50].

U nastavku istraživanja moguće je proračun učiniti preciznijim time što bi se razmotrile i korigovale sledeće aproksimacije: izjednačavanje impedansi uzemljenja kaskadno vezanih TS-a u slučaju proračuna za KV-ove, izjednačavanje redne impedanse kablovskih dionica i zanemarivanje rezistanse zemlje između uzemljivača svaka dva stuba NV-a. Takođe, u proračunu bi se zemljište moglo tretirati kao heterogeno, odnosno moglo bi se modelovati višeslojnim modelom tla (čime bi se vjerodostojnije uvažile stvarne karakteristike sredine). Program, koji je u pozadini ovog rada, bi uz kombinaciju sa optimizacionim algoritmima mogao da ponudi optimalne uticajne parametre, uz uvažavanje specificiranih praktičnih ograničenja i uz kriterijumsku funkciju minimizacije iznesenih napona. Pored pomenutog, izlaz pomenutog programa bi moglo biti optimalno uklopno stanje (i vodova i njihovih zaštitnih užadi/metalnih zaštita), uz kriterijumsku funkciju minimizacije iznesenih napona.

### **3. Uzemljenje u visokonaponskim razvodnim postrojenjima**

#### **3.1 Uloga, tipovi i elementi visokonaponskog razvodnog postrojenja**

Svaka vrijednost napona iznad 1 kV predstavlja visoki napon, prema aktuelnim standardima [1]. Visoki naponi prisutni su u skoro svim nivoima EES-a: proizvodnji, prenosu i distribuciji. Rijeđe se mogu naći na nivou potrošnje (fabrike i sl). Primarna svrha VNRP-a jeste povezivanje potrošača sa elektranama putem prenosnih i distributivnih vodova i transformatora. Osim pomenutog, uloga VNRP-a je i omogućavanje spajanja vodova istog naponskog nivoa, odnosno povezivanje mreža različitih naponskih nivoa. U teoriji električnih kola, postrojenja se tretiraju kao čvorovi sistema, dok vodovi predstavljaju grane. VNRP-a se mogu definisati kao objekti koji sadrže elektroenergetsku opremu neophodnu za priključak elektrana i potrošača na mrežu, promjenu naponskog nivoa i račvanje električne energije. U zavisnosti od namjene, dijele se na: rasklopna i transformatorska postrojenja. U rasklopnom postrojenju se stiču vodovi istog naponskog nivoa i njegova namjena je omogućavanje raspodjele električne energije. Sa druge strane, u transformatorskim postrojenjima, je pored raspodjele električne energije, moguće vršiti transformaciju naponskog nivoa. Prema namjeni, VNRP-a se mogu podijeliti na sledeći način: postrojenja za raspodjelu električne energije (postrojenja pri elektranama, postrojenja u prenosnoj mreži, postrojenja u distributivnoj mreži), industrijska postrojenja (namijenjena fabrikama, elektromotornim pogonima i sl.) i postrojenja specijalne namjene (električna brodska postrojenja, postrojenja za napajanje elektrovuče, gradilišta i sl.). Prema nazivnom naponu, razvodna postrojenja se dijele na: postrojenja visokog napona (vrijednosti napona iznad 1 kV) i postrojenja niskog napona (vrijednosti napona ispod 1 kV). Prema načinu izvedbe, mogu biti postrojenja unutrašnje (oprema je smještena u objektu i zaštićena od atmosferskih uticaja) i spoljašnje izvedbe (oprema je izložena atmosferskim uticajima). VNRP-a moraju zadovoljiti određene aspekte, i to: sigurnost ljudi u i oko postrojenja, mogućnost izdržavanja raznih ekstremnih uticaja okoline bez oštećenja opreme, naprezanja u normalnom pogonu i naprezanja pri kvarovima, magnetni i električni uticaji ograničeni na dozvoljene vrijednosti, nenarušavanje vizuelenog identiteta okoline, mogućnost održavanja (u naponskom stanju, koliko god je to moguće), mogućnost širenja i sl [2].

VNRP se, nezavisno od vrste, sastoji iz više strujnih krugova: glavni strujni krugovi (omogućavaju raspodjelu i transformaciju električne energije visokih napona i struja), strujni krugovi zaštite (oni obezbjeđuju zaštitu glavnih strujnih krugova u slučaju pojave nedozvoljenih radnih stanja), strujni krugovi mjerena (omogućavaju mjereno električnih veličina od interesa za bezbjedan i sigurnu rad postrojenja) i strujni krugovi signalizacije i upravljanja (obezbjeđuju upravljanje elementima glavnih strujnih krugova). Glavni strujni krugovi, sastoje se od sledećih elektroenergetskih elemenata: prekidača, rastavljača, osigurača, sabirnica, izolatora, odvodnika prenapona i mjernih transformatora [2].

Visokonaponski prekidači su elektroenergetski uređaji koji, u normalnom pogonu, služe da trajno provode struju, prekidaju i uspostavljaju strujni krug. U slučajevima poremećenih radnih režima (pa i najgoreg slučaja kratkog spoja), prekidači treba da imaju sposobnost kratkotrajnog provođenja struje kvara, njenog prekidanja (odnosno isključenja strujnog kruga). Prekidanje struje vrši se mehaničkim odvajanjem kontakata u samom prekidaču i taj proces prati pojava električnog luka (čije gašenje se odvija u drugom dijelu prekidača – komori sa medijumom). Električni luk predstavlja zaostalo električno pražnjenje koje se odvija posredstvom metalnih para, koje su nastale isparavanjem

istopljenog dijela materijala kontakata. Ovaj termički proces nastaje kao posledica visokih temperatura u tačkama poslednjih dodira mehaničkih kontakata. Visoke vrijednosti temperature nastaju uslijed naglog povećanja gustine struje, koje se javlja kao posledica brzog smanjenja broja dodirnih tačaka između dva mehanička kontakta. Izazovi projektovanja prekidača ogledaju se u zahtjevu za što bržim gašenjem električnog luka. U pogledu medijuma koji se koristi, razlikuju se sledeći prekidači: sa vazduhom na atmosferskom pritisku, pneumatski (sa komprimovanim vazduhom), prekidači sa magnetskim oduvavanjem luka, uljni prekidači, malouljni, prekidači sa sumpor heksafluoridom ( $SF_6$  gasom). Poslednja tri navedena tipa su rjeđe u upotrebi. Prekidači se biraju u zavisnosti od nazivnog napona i maksimalne struje u normalnom pogonu [3].

Rastavljači su elektroenergetske komponente čija je uloga da odvoje elemente koji su pod naponom od onih koji nisu. Osnovna razlika između rastavljača i prekidača je u tome što rastavljači ne mogu gasiti električni luk. Postojanje rastavljača omogućava vidljivo i sigurno isključenje elemenata, s obzirom na to da se vizuelno ne može provjeriti da li je prekidač adekvatno reagovao [3].

Visokonaponski osigurači imaju ulogu zaštite ostalih elemenata od posledica uzrokovanih djelovanjem struja kratkih spojeva. Osigurači prekidaju struju kvara prije negoli ona dostigne svoju maksimalnu vrijednost. Zbog električnog luka, koji predstavlja prateću pojavu prekidanja struje, visokonaponski osigurači su ograničeni na nazivne napone do 35 kV. Međutim, mogu se pronaći osigurači i za napone do 110 kV (oni posjeduju specifična svojstva prilagođena gašenju jačeg električnog luka, ali i veću cijenu). Dimenzionišu se u odnosu na nazivni napon mreže i nazivnu struju [3].

Sabirnice su neizolovani provodnici od bakra ili legura aluminijuma, koji (sa aspekta teorije električnih kola) predstavljaju čvor koji povezuje dovodne sa odvodnim vodovima i/ili transformatorima. Svaku od tri faze odgovara jedan provodnik, čiji međusobni razmak određuju naponska naprezanja u normalnom pogonu. Bitno je napomenuti da sabirnice povezuju priključne tačke vodova i/ili transformatora koje su istog naponskog nivoa. U suprotnom, došlo bi do sudara napona – što predstavlja havarijsko stanje. Ukoliko je postrojenje transformatorsko, tada sabirnice postoje i na strani višeg i na strani nižeg napona. Sa druge strane, ukoliko je rasklopno, sabirnice su samo jednog naponskog nivoa. Prostorno gledano, sabirnice su električna veza između mjerne, vodnih i trafo ćelija/polja. Polje predstavlja skup elektroenergetske opreme na otvorenom, koja je neophodna za pravilan priključak voda (nadzemnog ili kablovskog) ili transformatora na sabirnice. U postrojenjima zatvorenog tipa, kompletna funkcija polja je zamijenjena ćelijama. Oblik poprečnog presjeka faznog provodnika sabirnica zavisi od naponskog nivoa i vrste izvedbe postrojenja. Izbor veličine poprečnog presjeka sabirnica se vrši u zavisnosti od maksimalne vrijednosti trajne struje u normalnom pogonu (i to za najopterećeniju sekciju sabirnica) [3].

Izolatori su elementi postrojenja čija je uloga da se na/o njih vješaju neizolovani provodnici, da im pruže potporu i da omoguće prolazak provodnika iz jednog prostora u drugi. Izolatori fizički predstavljaju prelaz između provodnika i elemenata koji, u normalnom radnom pogonu, nisu pod naponom. U zavisnosti od uloge, izolatori se dijele na sledeće grupe: potporni, provodni i viseći [3].

Odvodnici prenapona su uzemljeni nelinearni otpornici koji, nailaskom prenapona, smanjuju svoju impedansu, odvodeći energiju prenapona u zemlju, nakon čega im se impedansa vraća na prvobitnu vrijednost. Najkarakterističniji su silicijum-karbidni (klasični) i cink-oksidni odvodnici prenapona [3].

Transformatori za mjerjenje i zaštitu su elementi EES-a namijenjeni mjerenu veličina od interesa, i to: napona, struje, aktivne i reaktivne snage, frekvencije i sl. Osnovna električna mjerena podrazumijevaju mjerjenje napona i struje. Direktno mjerjenje pomenutih veličina nije izvodljivo iz dva razloga. Prvi jeste potreba za znatno većom izolacijom, koja povećava dimenzije i gabarite mjernih transformatora i releja. Drugi razlog je potreba za velikim poprečnim presjekom provodnika, zbog termičkih i dinamičkih naprezanja uslijed proticanja struje velikih vrijednosti. Uloga mjernih transformatora jeste smanjenje napona i struja na vrijednosti pogodne za mjerjenje uređajima koji su adekvatnih dimenzija. Zahvaljujući prilagođenoj krivoj magnećenja mjernih transformatora, ostatak mjerne opreme je zaštićen od uticaja kratkih spojeva i ostalih kvarova. Prema kriterijumu mjerene veličine, mjerni transformatori se dijele na strujne, naponske i kombinovane strujno – naponske. Prema namjeni, na transformatore za mjerjenje i zaštitu. U zavisnosti od naponskog nivoa, dijele se na niskonaponske, srednjenaaponske i visokonaponske. U zavisnosti od vrste izolacije, razlikuju se suvoizolovani, uljni i SF<sub>6</sub> mjerni transformatori. Konvencionalni mjerni transformatori koriste feromagnetska jezgra, dok nekonvencionalni koriste druge feritne materijale [3].

### 3.2 Veze između postrojenja

Postrojenje bilo kog naponskog nivoa je galvanski povezano sa minimum jednim postrojenjem istog ili različitog naponskog nivoa. Međusobna galvanska veza postrojenja ostvaruje se putem NV-ova i KV-ova. Svaki vod, u svojim vodnim poljima u pripadajućim VNRP-ima, posjeduje rastavljače i/ili prekidače koji mogu imati status isključeno ili uključeno. Pored pomenute, postoji i veza između sistema uzemljenja postrojenja koja se ostvaruje putem zaštitnih užadi NV-ova i/ili metalnih električnih zaštita KV-ova. U ovom slučaju, prekidači i/ili rastavljači ne postoje, pa je veza između postrojenja putem sistema uzemljenja konstantna. Ovaj rad je baziran na pomenutoj, konstantnoj, vezi između uzemljenja postrojenja. Pomenutim vezama sistema uzemljenja se naponi, u slučaju kvara, mogu prenijeti u jedno ili više susjednih postrojenja. Vrijednosti tih napona mogu biti opasne za osoblje i/ili životinje u okolini postrojenja. Osim galvanskih veza, moguće su i elektromagnetske veze između postrojenja. Ukoliko visokonaponski vod, pogoden kvarom, prolazi blizu nekog postrojenja – u njemu može indukovati opasne napone (koji se dalje mogu iznijeti iz postrojenja već pomenutim odvodnim putevima). Međutim, prilikom projektovanja vodova i postrojenja, strogo se vodi računa da do ove situacije ne dođe.

### 3.3 Uzemljenje postrojenja

Uzemljenje je jedan od najvažnijih pojmova odgovornih za bezbjednost živih bića, kao i bezbjednost elektroenergetske opreme tokom prethavarijskih ili havarijskih radnih stanja. Uzemljenje je sistem provodnika koji straju kvara i/ili atmosferskog pražnjenja odvodi u zemlju. Fizički, ono je realizovano putem uzemljivačkog sistema koji se sastoji iz međusobno galvanski povezanih provodnika (položenih u zemlji), zaštitnih užadi NV-ova, metalnih zaštita KV-ova i drugih metalnih objekata koji su u kontaktu sa zemljom. Uzemljiti znači galvanski povezati neku tačku sa tačkom koja je na nultom potencijalu (potencijalu zemlje). Najznačajniji dio uzemljivačkog sistema je uzemljivač. Njega čini jedan ili više provodnika ukopanih u zemlji ili smještenih u betonu koji je u kontaktu sa zemljom. Uobičajeni oblici poprečnog presjeka provodnika uzemljivača su: kružni punog presjeka,

cijevasti, trakasti i od profilisanog metala. U normalnom radnom pogonu, elementi sistema uzemljenja nisu pod naponom. Oni dolaze na nenualte vrijednosti potencijala, u odnosu na zemlju, u slučaju kvara. Pod kvarom se podrazumijeva jednopolni kratak spoj sa zemljom, dvopolni kratak spoj sa zemljom i atmosferska pražnjenja. Struja kvara može biti izazvana direktno kvarom na elementu ili indukovanjem pri kvaru na nekom prostorno bliskom elementu. U zavisnosti od svrhe, razlikuju se sledeći tipovi uzemljenja: radno/pogonsko uzemljenje (uzemljenje zvjezdišta transformatora i/ili neutralne tačke generatora, visokonaponskih namotaja mjernih naponskih transformatora i uzemljenje mjernih kondenzatora), gromobransko uzemljenje (prihvata, spušta i odvodi struju atmosferskih pražnjenja u zemlju - štiteći tako osoblje i opremu) i zaštitno (uzemljenje metalnih elemenata čija uloga nije provođenje električne struje u normalnom pogonu, a koji, u slučaju kvara, mogu doći pod napon - kao što su metalna kućišta i nosači uređaja, metalne ograde i sl). Tipovi uzemljenja se mogu kombinovati na način da se spoje pogonsko i zaštitno ili zaštitno i gromobransko uzemljenje. Ovakav koncept kombinovanja različitih tipova uzemljenja naziva se združeno uzemljenje [4], [5], [6].

Radno/pogonsko uzemljenje može biti direktno (ako je veza sa uzemljivačem provodnik bez dodatne otpornosti) ili indirektno (ako se veza sa uzemljivačem izvodi posredstvom rezistanse, induktiviteta, kapaciteta ili njihove kombinacije). Radno uzemljenje neutralne tačke transformatora i generatora omogućava praćenje nulte komponente struje, što je neophodno za rad uređaja relejne zaštite. Naponski mjerni transformatori često mijere potencijal u odnosu na zemlju, te je stoga neophodno imati vezu sa istom (na pr. pri mjerenu faznog napona) [4], [5].

Uloga gromobranskog uzemljenja jeste prihvatanje i odvođenje struje atmosferskog pražnjenja u tlo, s ciljem zaštite ljudi i opreme. Gromobransko uzemljenje, pored pomenutog, ima zadatak da ograniči napon na koji dolazi uzemljivač - u suprotnom, opasni naponi bi se vratili na uzemljena metalna kućišta i/ili djelove pogonskih električnih kola. Dodatno, indukovali bi se naponi na površini tla u okolini postrojenja (zbog nemogućnosti adekvatnog odvođenja struje kvara – što je i razlog povišenog napona uzemljivača). Zato je od velike važnosti da projekat uzemljenja bude adekvatno urađen. Gromobransko uzemljenje obuhvata uzemljenje: stubova NV-ova, prihvavnog sistema instaliranog na objektima i odvodnika prenapona [4], [5].

Zaštitno uzemljenje se realizuje sa svrhom zaštite osoblja koje rukuje metalnim djelovima (koji nisu dio strujnih krugova) i/ili osoblja koje se nalazi u njihovoј blizini. Ono obuhvata: uzemljenje konstrukcije djelova postrojenja, objekata i uređaja koji, tokom kvara, mogu doći pod napon i uzemljenje sekundarnih namotaja strujnih i naponskih mjernih transformatora [4], [5].

Uzemljenje je važno za očuvanje sigurnosti osoblja, kao i stabilnosti i ekonomičnosti sistema. Pod pojmom sigurnosti osoblja, podrazumijeva se da uzemljivački sistem omogućava bezbjedno rukovanje opremom i djelovima opreme koji nisu pod naponom (tako što eventualne opasne napone koji se pojave na ovim elementima odvodi u zemlju), kao i bezbjedno kretanje po tlu unutar i oko postrojenja. Sigurnost se odnosi i na očuvanje opreme i uređaja od posledica kvarova. Od načina izvođenja sistema uzemljenja zavise vrijednosti napona dodira i koraka u havarijskim uslovima rada, kao i obezbeđenje zaštite ljudi i opreme od direktnog atmosferskog pražnjenja. Zahvaljujući kvalitetnom uzemljenju i zadovoljenim aspektom sigurnosti, osoblje je, uz pridržavanje zaštitnih mera, zaštićeno od strujnog udara. Gromobransko uzemljenje ima važnu ulogu u zaštiti elektroenergetske opreme od posledica atmosferskih pražnjenja, kao što su požari i oštećenja elektroenergetske opreme. Od sistema uzemljenja zavise uticaji elektroenergetske mreže na telekomunikacione instalacije, instalacije vodovoda, toplovida, armirano-betonske i druge

elektroprovodne elemente koji su u normalnom pogonu na neutralnom potencijalu, a kojima su elementi elektroenergetske mreže prostorno bliski. Samim tim, uzemljenje mora štititi i od pojave opasnih iznesenih napona.

Stabilnost je osobina koja predstavlja binarno pogonsko svojstvo sistema, tj. sistem može biti stabilan ili nestabilan. Narušena stabilnost podrazumijeva narušenu vrijednost frekvencije, slom napona, kaskadne ispade i na kraju, raspad EES-a. Stabilan sistem održava vrijednosti pogonskih veličina (frekvencije, napona i struje) u dozvoljenim granicama. Stabilnost može biti narušena ispadima određenih elemenata, koji bivaju isključeni djelovanjem uređaja relejne zaštite [7]. Kako stabilnost ne bi bila ugrožena, relejna zaštita mora biti selektivna. Njenim djelovanjem kvarovi trebaju biti lokalizovani, bez mogućnosti širenja na ostatak sistema. Od sistema uzemljenja zavise struje jednofaznih kratkih spojeva/zemljospojeva, kao i unutrašnji prenaponi koji se pri ovim kvarovima javljaju. Za izolovanje kvarova, svi releji moraju biti pravilno podešeni i moraju posjedovati dovoljno precizna i tačna mjerena. Na kraju, treba sagledati važnost sistema uzemljenja u konceptu pojma ekonomičnosti. S obzirom na to da uzemljenje štiti opremu i uređaje od posledica atmosferskih pražnjenja i kvarova, izbjegavaju se novčani izdaci za popravke i zamjene istih. Ovaj vid zaštite opreme produžava njen vijek trajanja, što investicije u novu opremu čini rjeđim. Uzemljenje omogućava brzu detekciju i eliminaciju kvarova, što smanjuje trajanje beznaponskih stanja. Od dužine i učestanosti beznaponskih stanja zavise i novčani izdaci prema potrošačima. Od uzemljenja neutralne tačke transformatora i/ili generatora zavisi nivo stepena izolacije opreme, kao i njena cijena. Pomenuti benefiti na operativne troškove sistema, direktno doprinose njegovom ekonomičnjem funkcionisanju.

Uzemljivači mogu biti izvedeni kao zasebni elementi ili kao njihova kombinacija. Zasebno izvedeni mogu biti:

- štapni (puni okrugli provodnik, cijev, uže ili traka)
- pločasti
- prstenasti (provodnik, traka ili uže savijeni u obliku kruga ili pravougaonika)
- mrežasti (međusobno povezani provodnici, cijevi, trake ili užad) [5].

Kada se govori o kombinaciji zasebnih uzemljivačkih elemenata, kombinovani uzemljivači mogu biti:

- mrežasti uzemljivači sa vertikalnim štapovima na jednom ili više mesta po površini mreže
- prstenasti uzemljivači sa horizontalnim štapovima
- više međusobno spojenih prstenova ili štapova [4], [5].

U tabeli 1 su date vrijednosti specifičnog električnog otpora ( $\rho$ ) najčešćih vrsta zemljišta, uz napomenu da je struktura zemljišta posmatrana kao homogena cjelina.

Tabela 1. Specifične električne otpornosti homogenog zemljišta [12]

| Vrsta zemljišta                     | $\rho[\Omega\text{m}]$ |
|-------------------------------------|------------------------|
| Humus, treset                       | 20                     |
| Glina, ilovača, vlažni fini pijesak | 100                    |
| Pjeskulja                           | 300                    |

|                   |              |
|-------------------|--------------|
| Suvi fini pijesak | 500          |
| Krečnjak          | 700          |
| Stijene           | 3000 – 10000 |

Uzemljivači se u tlu mogu postavljati horizontalno, vertikalno ili koso. U praksi, horizontalni uzemljivači se najčešće postavljaju plitko, vertikalni na većim dubinama, dok se kosi koriste za oblikovanje potencijala na površini tla [12]. Pri projektovanju uzemljivačkog sistema postrojenja, neophodno je uvažiti sledeće uticajne faktore, bitne sa tehničke i sigurnosne tačke gledišta:

- Specifični električni otpor tla ( $\rho [\Omega]$ ) koji zavisi od strukture tla, njegove vlažnosti, saliniteta i temperature. Niska specifična električna otpornost je poželjna za bolje uzemljenje. U slučaju različitih tipova tla duž vertikalnog pravca, poželjno je koristiti model višeslojnog tla – čime se uvažava vertikalna distribucija otpornosti
- Maksimalnu vrijednost i trajanje struje kvara koja može teći sistemom uzemljenja
- Nominalni radni napon, kao i maksimalni dozvoljeni radni napon
- Frekvencija sistema
- Geometriju (raspored opreme u postrojenju, dimenziije prostora namijenjenog za uzemljivač, dubina na kojoj se polažu elektrode uzemljivača i sl.)
- Napone dodira i koraka u/oko aktuelnog postrojenja, kao i njegovih susjednih postrojenja (do kojih se mogu iznijeti opasni naponi u slučaju kvara)
- Tip izvođenja uzemljenja (prstenasto, mrežasto i td), njegov materijal, kao i kvalitet spojeva između različitih djelova sistema uzemljenja
- Blizinu okolnih podzemnih instalacija, kao što su vodovodne i kanalizacione cijevi, telekomunikacije, cijevi za gas i sl.
- Meteorološke uslove (padavine, temperatura, pojava leda i td), kao i seizmološku aktivnost područja
- Ekološka ograničenja
- Finansije, u smislu dostupnog budžeta, kao i vrijednosti troškova zamjene i proširenja aktuelnog sistema uzemljenja [13], [14], [15], [16], [17].

Sistem uzemljenja se dimenzioniše prema:

- Toplotnim naprezanjima (odabir materijala (najčešći bakar ili pocićani čelik) i odgovarajućeg presjeka provodnika (koji zavisi od mehaničkih naprezanja, korozije i maksimalno trajno dozvoljene struje provodnika))
- Maksimalnim naponima koji se javljaju u sistemu uzemljenja (naponi dodira i koraka moraju biti manji od maksimalno dozvoljene/propisane vrijednosti) [18], [19], [20].

Elektroenergetska mreža se, shodno načinu uzemljenja neutralne tačke, dijeli na:

- Izolovanu mrežu (kod prolaznih zemljospojeva dolazi do gašenja struje zemljospoja, jeftinije je zaštitno uzemljenje, posledice kvarova su manje, teže se postiže selektivnost relejne zaštite,

proširenjem mreže raste struja zemljospojeva do granice nemogućnosti samogašenja prolaznih zemljospojeva, češća pojava unutrašnjih prenapona i td.)

- Kompenzovanu mrežu (u neutralnu tačku dodaje se prigušnica sa ciljem superponiranja induktivne struje sa kapacitivnom vrijednošću struje zemljospoja (koja je usled proširenja mreže dostigla vrijednost koja onemogućava samogašenje prolaznih zemljospojeva). Ovim se ponovo postižu uslovi samogašenja električnog luka zemljospojeva, takođe su sniženi prenaponi i toplotna naprezanja. Mana je elektromagnetna energija koju prigušnica akumulira i koja može izazvati prenapone u trenutku isključenja kvarova. Izazovno je postizanje dovoljne osjetljivosti uređaja relejne zaštite)
- Mrežu uzemljenu preko niskoomske impedanse (ovdje se postavlja rezistansa ili reaktansa između neutralne tačke i zemlje, sa ciljem ograničenja (ne poništavanja) struje zemljospoja na određenu vrijednost. Zato u ovom slučaju (usled stabilnog električnog luka) nema pojave intermitentnih prenapona, zbog visokih vrijednosti struja zemljospoja – zaštita je jeftinija i jednostavnija, lakše je otkrivanje kvara u mreži. Međutim, veći su naponi dodira i koraka u i oko postrojenja i pouzdanost snabdijevanja je snižena zbog nužnih isključenja u slučaju kvara) [9–12].

Preporuka je da se mreže napona većih ili jednakih 110 kV direktno uzemljavaju, mreža 35 kV se najčešće zemlji preko niskoomske impedanse, mreže 10 kV i 20 kV se zemlje preko niskoomske impedanse ili rade sa izolovanom neutralnom tačkom. Niskonaponska mreža se direktno zemlji (veže na združeno uzemljenje) na niskonaponskoj strani (0,4 kV strani). Poseban akcenat se stavlja u slučaju dominantne upotrebe KV-ova, jer je njihova vrijednost kapacitivnih struja značajno veća negoli u slučaju NV-ova. Dakle, glavni parametar u odnosu na koji se bira tip uzemljenja mreže jeste kapacitivna vrijednost struje zemljospoja. Za najniže vrijednosti ovih struja, preporuka je izolovana mreža. Za maksimalne vrijednosti kapacitivnih struja zemljospoja koristi se mreža izolovana preko niskoomske impedanse [21], [22], [23].

### 3.4 Opis i tipovi kvarova u postrojenju

EES se može nalaziti u jednom, od pet mogućih, radnih režima. Radni režim je jednoznačno određen kombinacijom statusa ispunjavanja/neispunjavanja svakog od tri postojeća tipa ograničenja. Ograničenje se opisuje skupom matematičkih relacija. Razlikuju se: ograničenje potrošnje (predstavlja jednačinu bilansa aktivnih i reaktivnih snaga u svim čvorovima EES-a, time globalno za cijeli sistem), pogonska ograničenja (predstavljaju nejednačine kojima se definisu granične vrijednosti frekvencije sistema, napona čvorova, tokova snaga po granama, aktivne i reaktivne snage generatora i drugih pogonskih i sistemskih parametara) i sigurnosna ograničenja (predstavljaju nejednačine kojima se izražava stepen sigurnosti EES-a). Shodno statusu ispunjavanja ograničenja, razlikuju se sledeći radni režimi:

- Normalni sigurni režim (zadovoljena su sva tri tipa ograničenja)
- Prethavarijski režim (narušena su sigurnosna ograničenja, preostala su zadovoljena – na pr. snižen nivo rezerve usled ispada jednog elementa za EES stepena sigurnosti „n-1”)

- Poremećeni režim (zadovoljeno je samo ograničenje potrošnje, dok su preostala ograničenja narušena, važno je napomenuti da je u ovom režimu kompletan sistem u pogonu)
- Kritični režim (narušena su sva tri tipa ograničenja, važno je napomenuti da je u ovom režimu dio EES-a van pogona)
- Posthavarijski režim (zadovoljena su samo pogonska ograničenja, preostala su narušena).

Sigurnom nivou rada pripada samo normalni sigurni režim, nesigurni nivo rada obuhvata prethavarijski i posthavarijski režim rada, dok kritični i poremećeni režimi pripadaju ugroženom nivou rada EES-a [7], [24].

Akcije koje uzrokuju narušavanje neka od tri tipa ograničenja i izvode EES iz normalnog sigurnog režima se mogu podijeliti na opasna pogonska stanja i kvarove. Opasna pogonska stanja nastaju narušavanjem sigurnosnih parametara ili ograničenja sistema, ili narušavanjem pogonskih parametara (bez narušavanja pogonskih ograničenja). Najčešća opasna pogonska stanja su: nedozvoljeno visoki naponi koji naprežu izolaciju opreme i uređaja, nedozvoljeno niski naponi koji predstavljaju smetnju ispravnom radu potrošača, preopterećenje koje termički napreže opremu (izazvano prevelikim konzumom, smanjenim kapacitetom mreže ili sniženom proizvodnjom), spoljašnji kratki spojevi, nesimetrija (rizična je i za EES i za potrošače). U toku trajanja opasnih pogonskih stanja dolazi do odstupanja struja i/ili napona i/ili frekvencije od nominalnih vrijednosti, bez prekoračenja dozvoljenih granica (što bi predstavljalo ugroženi nivo rada sistema). Opasna pogonska stanja se mogu nalaziti u zoni normalnog sigurnog režima (tada se opasno pogonsko stanje otklanja preventivnim upravljanjem) ili u zoni prethavarijskog/posthavarijskog režima rada. Kvarovi su nepredviđeni i neželjeni događaji ili stanja koja narušavaju normalan siguran režim rada. Ako su kvarovi sa zemljom, tada elementi, koji u normalnom režimu nisu pod naponom, dolaze na nenultu vrijednost potencijala (trenutno ili dugotrajno). Kvarovi se mogu podijeliti na prolazne i trajne. Prolazni kvarovi su kratkotrajni događaji čiji uzrok nestaje sam od sebe neposredno nakon nastanka kvara, dok se (za razliku od njih) trajni kvarovi tretiraju kao stanja. U praksi oba tipa kvarova mogu nastati kao posledica: atmosferskih pražnjenja u elektroenergetskе objekte ili njihovu blizinu, probaja izolacije, preskoka izolacije, vjetra, leda, snijega, visokih temperatura, zemljotresa, uticaja životinja, habanja opreme, pregrijavanja, neadekvatnog održavanja, djelovanja trećeg lica, grešaka softverskih alata koji se koriste za upravljanje EES-om i sl. Prolazni kvarovi najčešće obuhvataju preskoke na potpornim/provodnim izolatorima, sabirnicama, strujnim transformatorima i sl. Često se javljaju kada je povećano prisustvo vlage i prašine – odnosno smanjen je izolacioni nivo. Trajnim kvarom smatra se pad/lom stuba, prekid faze, probaj izolatora, curenje ulja iz transformatora, probaj kablovske glave/spojnice i sl. Ukoliko su prolazni kvarovi dovoljnog inteziteta, mogu prerasti u trajne kvarove. Nakon prestanka djelovanja uzroka pojave prolaznog kvara, sistem se vraća u ustaljeni (normalni sigurni) radni režim. Za razliku od prolaznog, posledice djelovanja uzroka trajnog kvara ostaju prisutne i nakon prestanka njegovog djelovanja. Veliki je broj kvarova koji se mogu dogoditi, iz razloga što EES funkcioniše u realnom vremenu pod uticajem nepoznatog broja faktora, čiji uticaji i kombinacija nisu u potpunosti predvidljivi. Međutim, iskustvo eksploracije EES-a pruža uvid u veliki broj kvarova, sa akcentom na kratke spojeve (koji su česti i sa opasnim posledicama) [2].

Kratak spoj predstavlja direktni ili indirektni kontakt dvije tačke koje su na različitim vrijednostima potencijala. Razlikuje se:

- Jednofazni/jednopolni kratak spoj (direktan kontakt, ili kontakt preko prelazne impedanse nezanemarljive vrijednosti, faze i zemlje, pri čemu je neutralna tačka mreže uzemljena direktno ili indirektno. Ukoliko je neutralna tačka izolovana, tada se ovaj kratak spoj naziva zemljospoj)
- Dvofazni/dvopolni kratak spoj (direktan kontakt, ili kontakt preko prelazne impedanse nezanemarljive vrijednosti, dvije faze)
- Trofazni/tropolni kratak spoj (direktan kontakt, ili kontakt preko prelazne impedanse nezanemarljive vrijednosti, sve tri faze) [3], [9], [25].

Zemljospoj predstavlja direktan ili indirekstan kontakt faze i zemlje, pri čemu je neutralna tačka mreže izolovana. U zavisnosti od vrijednosti prelaznog otpora na mjestu dodira faznog provodnika sa zemljom, zemljospoj se dijeli na:

- Metalni spoj sa malim prelaznim otporom
- Preskok u vazduhu
- Intermittentni preskok sa električnim lukom velikog nelinearnog otpora.

Većina zemljospojeva koji se dogode u mreži, sa dominantnim NV-ovima, je prolaznog karaktera, za razliku od zemljospojeva kod KV-ova. U zavisnosti od vrijednosti otpora na mjestu kvara, zemljospoj se dijeli na:

- Niskoomski zemljospoj (na pr. kontakt faze i čelično-rešetkastog stuba, pad faznog provodnika na dobro provodnu zemlju, kontakt čovjeka sa faznim provodnikom, kontakt faze i ograde postrojenja, vidljivi proboci izolatora čelično-rešetkastog ili armirano-betonskog stuba)
- Srednjeomski zemljospoj (na pr. proboci transformatora srednji/niski napon, kontakt faze i grane drveta, vizuelno neuočljivi proboci izolatora čelično-rešetkastog ili armirano-betonskog stuba)
- Visokoomski zemljospoj (na pr. proboci izolatora na drvenom stubu, kontakt faze i suve grane – ovo su uglavnom tinjajući kvarovi koje zaštita teže registruje).

Poseban tip zemljospojeva su intermittentni zemljospojevi koji predstavljaju veći broj uzastopnih prolaznih kvarova, koji se repetativno pojavljuju preko električnog luka kada napon neispravne faze prekorači određenu vrijednost dovoljnu za preskok izolacije. Zbog zaostalih nanelektrisanja, nakon gašenja luka, koja stvaraju jednosmjerni napon koji se superponira sa radnim naizmjeničnim naponom – javljaju se prenaponi izuzetno visokih amplituda (posebno u izolovanim mrežama). Ti prenaponi omogućavaju ponovno paljenje električnog luka, pa je time u izolovanim mrežama broj ponavljanja paljenja luka veći negoli u slučaju kompenzovanih mreža [2].

Maksimalna struja kratkog spoja najčešće se javlja pri trofaznom kratkom spiju. Međutim, kada se govori o iznesenim naponima, u obzir dolaze samo nesimetrični kratki spojevi. Razlog je taj što trofazni kratak spoj predstavlja simetričan kvar, čije struje (ogromnih vrijednosti) u vektorskom zbiru daju nulu (odnosno, postoji samo direktna komponenta u domenu Fortescue-ove transformacije [3]). Odatle slijedi zaključak da uzemljivač u toku trajanja trofaznog kratkog spoja ne odvodi struju. Sa druge strane, struja kvara nesimetričnih kratkih spojeva sadrži, osim direktne, i inverznu komponentu, a često i nultu. Dvofazni kratak spoj sadrži direktну i inverznu, dok dvofazni kratak spoj sa zemljom, jednofazni kratak spoj i zemljospoj sadrže direktnu, inverznu i nultu komponentu. Sa aspekta

iznesenih potencijala, od važnosti su samo kratki spojevi koji dovode uzemljivač postrojenja na nenultu vrijednost potencijala, odnosno kvarovi čija struja posjeduje nezanemarljivu nultu komponentu. Zato su od važnosti sledeći tipovi kratkog spoja – dvofazni sa zemljom i jednofazni (u slučaju zemljospoja, nulta komponenta struje kratkog spoja je niža, zbog izolovane neutralne tačke). Kod kog od njih će se javiti maksimalna struja kvara zavisi od odnosa direktne, inverzne i nulte komponente impedanse sistema gledane iz mjesta kvara. U slučaju zadovoljene relacije (1), maksimalna struja kratkog spoja javlja se pri jednofaznom kratkom spoju. Dok je u slučaju zadovoljene relacije (2), maksimalna struja kratkog spoja pri dvofaznom kratkom spoju sa zemljom.

$$Z_1 * Z_0 > Z_2^2 \quad (1)$$

$$Z_1 * Z_0 < Z_2^2 \quad (2)$$

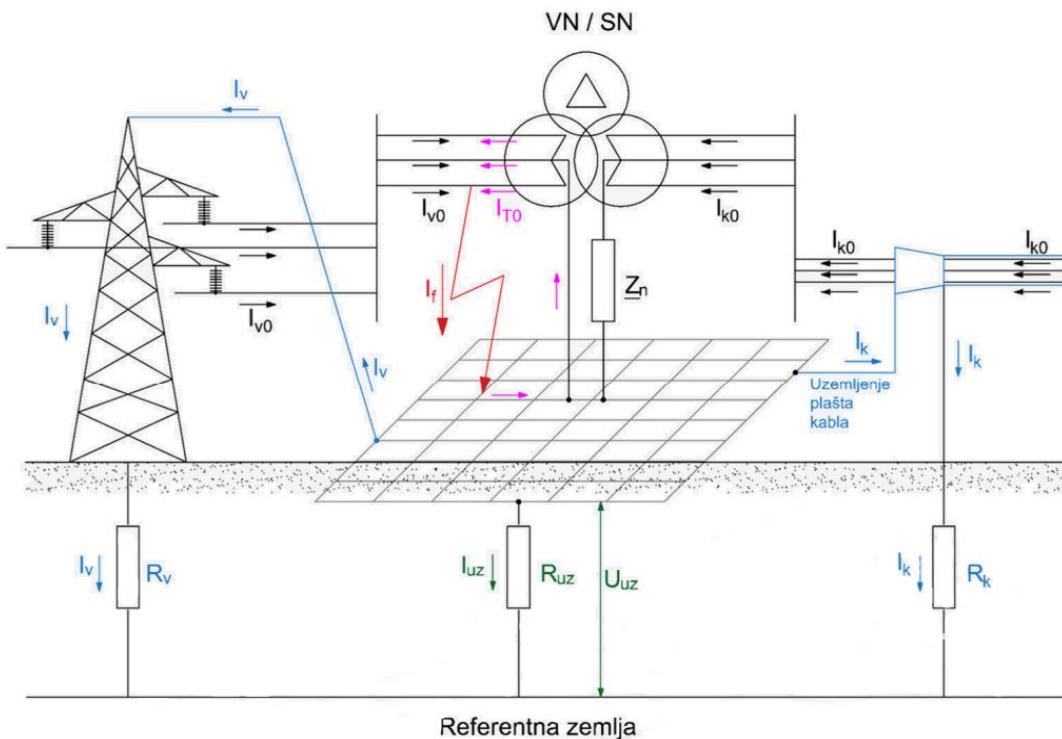
Dodatno, neophodno je proračunati da li se maksimalna struja kvara javlja pri kratkom spoju na niskonaponskoj ili višenaponskoj strani transformatorskog postrojenja. Na kraju, neophodno je uvažiti lokaciju na kojoj će se, za najnepovoljniji tip kratkog spoja, javiti maksimalna struja kvara [26].

## 4. Izneseni potencijal

### 4.1 Definicija i način nastanka iznesenog potencijala

Potencijal koji na uzemljivaču postrojenja stvaraju struje, koje dolaze zaštitnim užadima NV-ova ili metalnim zaštitama KV-ova – izazvane kvarom u nekom drugom postrojenju, naziva se izneseni potencijal. Iznošenje potencijala ne mora pratiti svaki kvar u postrojenju, kojim uzemljivač tog postrojenja dolazi na nenultu vrijednost napona. To zavisi od inteziteta kvara i udaljenosti susjednih postrojenja. Iz tog razloga, od interesa je razmatrati najrizičnije kvarove. Ukoliko je, sa aspekta iznesenih potencijala, postrojenje bezbjedno po okolna postrojenja, biće sigurno i u situacijama pojave kvarova nižeg inteziteta (nižih struja i napona kvara) [26], [28].

Kada se dogodi dvofazni kratak spoj sa zemljom, jednofazni kratak spoj ili zemljospoj na nekom elementu VNRP-a, njegov uzemljivač dolazi pod napon. Taj napon na uzemljivaču je posledica odvođenja nekompletne struje kvara u zemlju. Dio struje kvara odvodi se sa uzemljivača zaštitnim užadima NV-ova i/ili metalnim zaštitama KV-ova. Ta iznesena struja dovodi uzemljivače susjednih postrojenja na nenultu vrijednost potencijala u odnosu na zemlju (odносно pod nenultu vrijednost napona). Ukoliko su ti naponi dovoljno visoki, mogu prouzrokovati nedozvoljeno velike vrijednosti napona koraka i napona dodira u i/ili oko postrojenja. Zaključak je da, na određenoj lokaciji u EES-u, posledice mogu ostaviti udaljeni kvarovi. Na slici 1 prikazana je raspodjela struje kvara u postrojenju.



Slika 1. Raspodjela struja u sistemu uzemljenja VNRP-a [26]

## 4.2 Posledice iznesenog potencijala i mjere za njegovo sniženje

Izneseni potencijal je rizičan po osoblje koje se nalazi unutar zgrade i/ili ograde postrojenja, zbog pojave opasnih napona koraka i napona dodira. Struja uzemljivača dovodi tačke okolnog tla na nenulte vrijednosti potencijala. Time se između različitih tačaka tla javlja napon. Lica, koja hodaju po takvoj podlozi, su izložena naponu koraka. Takođe, usled iznesenih potencijala kućišta i oklopi elektroenergetskih uređaja i elemenata mogu doći pod napon, kojem su direktno izložena lica koja te elemente dodiruju. Posledica izloženosti živih bića nedozvoljeno velikim vrijednostima napona dodira i koraka je strujni udar. Oprema nije ugrožena iznesenim potencijalima, s obzirom na to da je dimenzionisana na mnogo veće kratkotrajne vrijednosti amplitude napona [29–32].

Dozvoljeni napon koraka definiše se kao maksimalan napon kom smije biti izložen čovjek koji se kreće po tlu unutar ili oko postrojenja. Potencijalna razlika koraka predstavlja potencijalnu razliku između dvije tačke na površini tla međusobno udaljene jedan metar, koje se mogu premostiti korakom. Napon koraka predstavlja stvarni napon kome je izložen čovjek prilikom koračanja. On je manji od potencijalne razlike koraka za pad napona na prelaznoj otpornosti između površine tla i stopala. Strujno kolo se zatvara između dva stopala [30], [34]. Napon koraka, izazvan iznesenim naponom, se računa prema relaciji (3), koja je dobijena na osnovu šeme sa slike 2.b:

$$U_k = \frac{E_k}{1 + \frac{2 * R_s}{R_c}} \quad (3)$$

gdje je:

$U_k$  – napon koraka TS-e do koje se iznosi napon [V]

$E_k$  – razlika potencijala koraka TS-e do koje se iznosi napon [V]

$R_s$  – prelazna rezistansa između tla i stopala [ $\Omega$ ]

$R_c$  – rezistansa čovjekovog tijela na putu noge – ruke [ $\Omega$ ], [26].

Dozvoljeni napon dodira definiše se kao maksimalan napon kom smije biti izložen čovjek koji dodiruje provodne elemente postrojenja, koji u normalnom radnom režimu nisu pod naponom. Potencijalna razlika dodira predstavlja potencijalnu razliku između uzemljenih objekata/elementa i stajališta koja se može premostiti dodirom. Napon dodira predstavlja stvarni napon kome je izložen čovjek prilikom dodira. On je, takođe, manji od potencijalne razlike dodira za pad napona na prelaznoj otpornosti između površine tla i stopala. Strujno kolo se zatvara preko ruke i stopala [30], [34]. Napon dodira, izazvan iznesenim naponom, računa se prema sledećoj relaciji (dobijenoj uz pomoć slike 2.a):

$$U_d = \frac{E_d}{1 + \frac{R_s}{2 * R_c}} = \frac{f_d * U_i}{1 + \frac{R_s}{2 * R_c}} \quad (4)$$

gdje je:

$f_d \leq 1$  – koeficijent izjednačenosti potencijala (njime se uvažava raspodjela potencijala na različitim objektima (razvodni kablovski ormari, stubovi i td.) usled proticanja struje, koja je posledica iznesenog napona, sa uzemljivača u zemlju) [26].

Uvažava se pretpostavka da je napon koraka po pravilu niži od napona dodira i da je manje opasan. Zato je kriterijum pri projektovanju uzemljenja TS-e, sa aspekta zaštite susjednih postrojenja od iznesenih napona, sledeći:

$$R_{uz} \leq \frac{E_{d,doz,susjedne\ TS}}{f_d * k_i * I_{uz}} \quad (5)$$

gdje je:

$R_{uz}$  – rezistansa TS-e iz koje se iznose naponi

$E_{d,doz,susjedne\ TS}$  – maksimalno dozvoljena razlika potencijala dodira neke od TS-a, sa kojom je TS-a (iz koje se iznose naponi) galvanski povezana

$k_i$  – koeficijent iznesenog potencijala

$I_{uz}$  – struja koja se sa uzemljivača odvodi u zemlju, ili iz okolne zemlje dolazi na uzemljivač TS-e iz koje se iznose naponi [26].

„Dozvoljena vrijednost napona dodira i koraka ima istu vrijednost i ona je propisana standardom. Daje se u funkciji vremena trajanja kvara:

$$U_{doz} = \begin{cases} 1000\ V, & t \leq 0.075\ s \\ 75/t, & 0.075\ s \leq t \leq 1.153\ s \\ 65\ V, & t \geq 1.153\ s \end{cases} \quad (6)$$

Vrijeme kvara određuje se za normalne uslove rada zaštitne opreme i prekidača. U slučaju mogućnosti uzastopnog ponovnog uspostavljanja struje zemljospoja (aktiviran APU<sup>3</sup>), vrijeme trajanja kvara  $t$  se određuje kao:

- Zbir pojedinačnih vremena trajanja zemljospojeva, ako pauze između ponovnih uspostavljanja zemljospojeva nisu duže od 0.5 s
- Vrijeme trajanja jednog zemljospoja, ako su pomenute pauze duže od 0.5 s [26]. “

Na slici 2 prikazan je model čovjeka izloženog naponu koraka i naponu dodira.



Slika 2. Napon dodira (a) i napon koraka (b) [26]

<sup>3</sup> APU – automatsko ponovno uključenje.

Na slici 3 nalazi se prikaz raspodjele potencijala po površini tla u neposrednoj okolini transformatorskog postrojenja. Takođe, može se vidjeti vizuelna interpretacija razlike potencijala dodira i koraka. Maksimalni lokalni ekstremumi funkcije raspodjele potencijala javljaju se na mjestima gdje su elementi uzemljivača, dok se lokalni minimumi javljaju na polovini rastojanja između tih elemenata. Udaljavajući se od VNRP-a, potencijali eksponencijalno opadaju. Uočljivo je da potencijalne razlike dodira i koraka zavise od:

- Raspodjele i vrijednosti potencijala na površini tla
- Rasporeda opreme, uređaja i drugih uzemljenih elemenata, koji u slučaju kvara mogu doći pod napon.

Veličine koje figurišu na slici 3 su:

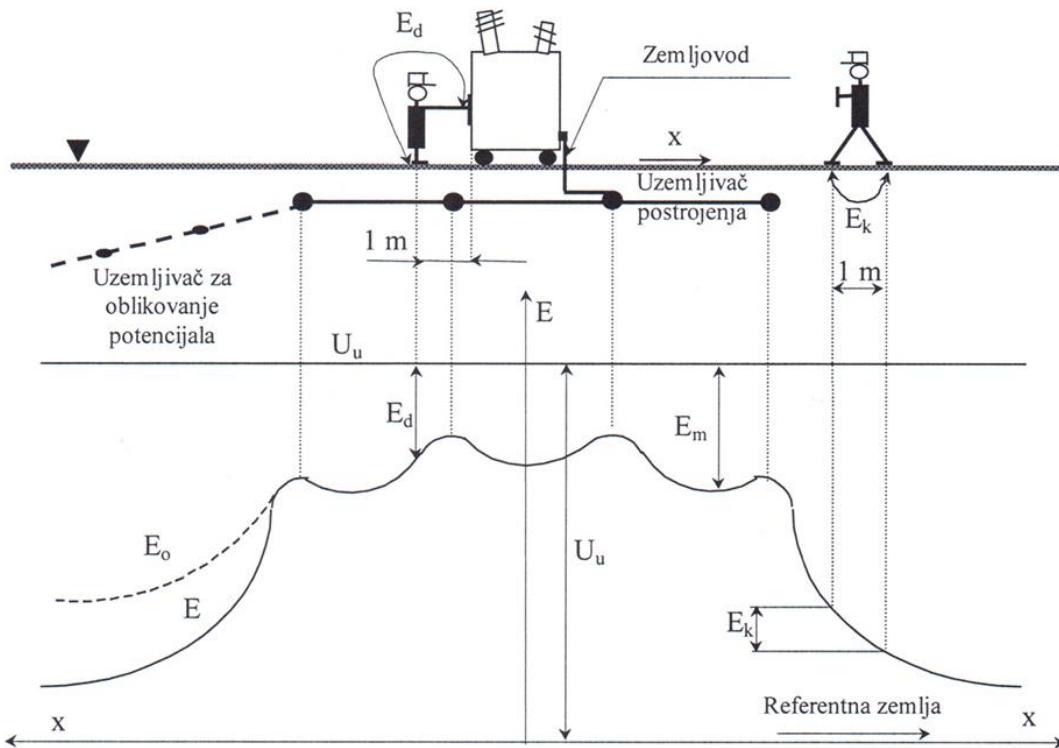
$U_u$  – napon uzemljivača [V]

$E$  – električni potencijal u [V], koji predstavlja ordinatu

$x$  – rastojanje u [m], koje predstavlja apisu

$E_0$  – vrijednost potencijala za slučaj upotrebe uzemljivača za oblikovanje potencijala<sup>4</sup>

$E_m$  – maksimalna vrijednost potencijalne razlike dodira [33–38].



Slika 3. Raspodjela potencijala po površini tla, razlika potencijala dodira i koraka [26]

<sup>4</sup> Oblikovanje potencijala je mijenjanje raspodjele vrijednosti potencijala na površini tla, u cilju smanjenja potencijalnih razlika dodira i koraka. Postiže se dodavanjem elektroda uzemljivača na mjestima gdje se javljaju nedozvoljene vrijednosti razlika pomenutih potencijala.

Neke od mjera za sniženje iznesenih napona su snižavanje napona na sistemu uzemljenja napojne TS-e i smanjenje vremena trajanja zemljospoja u mreži visokog napona. Snižavanje napona na sistemu uzemljenja napojne TS-e se postiže smanjenjem struje zemljospoja (koje se postiže odabirom konfiguracije mreže, koja ne bi trebala biti prstenasta u dužem trajanju, ili ubacivanjem impedanse za ograničavanje struje zemljospoja), smanjenjem redukcionih faktora primjenom provodnijih zaštitnih užadi, smanjenjem impedanse uzemljenja dodavanjem vertikalnih uzemljivača. Smanjenje vremena trajanja zemljospoja u mreži visokog napona postiže se ugradnjom relejne zaštite sabirnica, prepodešenjem distantne zaštite i sl. Neke od dodatnih mjera su ukopavanje bakarnih provodnika uz kablove sa neprovodnim spoljnim omotačem, sprovođenje oblikovanja potencijala u okolini TS-e srednji na niski napon i sl [6].

#### 4.3 Zaštita od strujnog udara

Strujni udar predstavlja iznenadni, kratkotrajni prolazak električne struje kroz tijelo sa mogućim posledicama težih fizičkih povreda ili smrti. Električna struja koja izaziva strujni udar može biti jednosmjerna, naizmjenična ili impulsna, tehničkog ili atmosferskog porijekla. Posledice tehničke električne struje na ljudski organizam zavise od inteziteta struje (koji zavisi od: napona između tačaka premošćenih ljudskim tijelom, otpornosti tijela i prelaznog otpora), njene frekvencije (posledice djelovanja jednosmrjerne i naizmjenične električne struje (frekvencije različite od 50 Hz) na organizam su blaže u odnosu na efekte električne struje industrijske učestanosti (50 Hz) – kojoj su ljudi, na žalost, najizloženiji) i od trajanja izloženosti električnoj struci (posledice na organizam su veće ukoliko je izloženost električnoj struci duža). Najčešće vrste strujnog udara, u pogledu puta kojim se zatvara strujni krug, su sledeće: preko glave, tijela i nogu; preko ruke, tijela i nogu; preko obje noge; preko obje ruke. Uticaj električne struje na organizam ostavlja posledice koje se mogu svrstati u sledeće tipove dejstava:

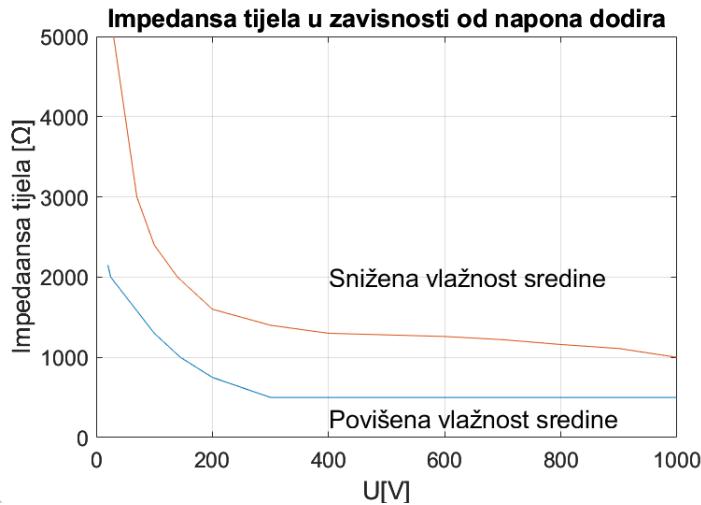
- Toplotno dejstvo (stvaranje opeketina, spoljašnjeg i unutrašnjeg tipa, usled razaranja tkiva, koje nastaje kao posledica zagrijavanja usled Joule-ovog zakona<sup>5</sup>)
- Elektrohemisko dejstvo (pojava elektrolize i trajna oštećenja tkiva)
- Mehaničko dejstvo (obuhvata grčenje mišića zbog poremećenih nervnih impulsa, zastoj rada srca i ostalih organa kontrolisanih nervnim impulsima) [39–42].

Impedansa ljudskog tijela nije konstantna vrijednost, već zavisi od tjelesne konstitucije, pola, starosti osobe, napona kom je osoba izložena, suvoće kože, hidriranosti organizma, vlažnosti prostorije/sredine, puta kojim se struja zatvara kroz tijelo i mnogih drugih faktora. Međutim, otpornost ljudskog tijela se ugrubo može uzeti sa vrijednošću od oko  $1000 \Omega$ . Prelazni otpor tla na mjestu stajanja kreće se od  $0 \Omega$  (vlažne betonske, zemljane i metalne podloge) do preko  $500\,000 \Omega$  (suve drvene podloge). Impedansa ljudskog tijela, u zavisnosti od napona dodira, data je grafikom na slici 4. Donja kriva odgovara povišenoj vrijednosti vlažnosti sredine, dok gornja funkcija odgovara sniženoj vrijednosti vlažnosti sredine. Grafici su ograničene tačnosti zbog aproksimacije zavisnosti

---

<sup>5</sup> Prvi Joule-ov zakon glasi: količina toplotne energije koja se oslobodi u provodniku kroz koji protiče električna struja brojno je jednak proizvodu kvadrata jačine električne struje, rezistanse provodnika i vremenskog trajanja proticanja te struje.

impedanse tijela od napona dodira. Date impedanse se odnose na odraslu osobu prosječne konstitucije, za slučaj suve kože, pri čemu se strujni krug zatvara putem ruka – ruka ili ruka – noge [1], [43], [44].



Slika 4. Impedansa ljudskog tijela u zavisnosti od napona dodira

U nastavku su objašnjene posledice proticanja jednosmjerne i naizmjenične električne struje na ljudski organizam.

#### ➤ Dejstvo jednosmjerne električne struje na čovjeka

Kontrakcije mišićnih tkiva su posljedica električnih impulsa, koje prenose nervi. Ti električni impulsi mogu biti prirodnog ili vještačkog porijekla. Pobuđivanje nervnog sistema, usled proticanja jednosmjerne struje, dešava se samo kada se uspostavlja ili prekida strujni tok. Osim električne ekscitacije nerava, kontrakcija mišićnog tkiva može da se izazove direktnim električnim dejstvom na sami mišić. Kada se uspostavi konstantan električni potencijal između određenih tačaka, dolazi do intezivnog kretanja jona. To kretanje jona stvara promjenu njihove koncentracije u određenim tkivima organa. Kada je struja dovoljnog intenziteta, usled zagrijavanja tkiva, nastaju opekatine (posljedica prvog Joule-ovog zakona). Posljedice, koje ostavlja protok jednosmjerne struje, su sledeće: nekroza tkiva (lokalna smrt tkiva) usled termičkog djelovanja; hemoliza krvi – razaranje membrane eritrocita koju prati oslobađanje hemoglobina i nagomilavanje tečnosti u alveolama pluća; nepovratna oštećenja krvnih sudova usled pucanja njihovih zidova, prekidanja elastičnih vlakana i degenerativnih promjena ćelija; oštećenja centralnog nervnog sistema u vidu nagomilane tečnosti (edemi), manjih krvarenja i degenerativnih promjena pojedinih ćelija (oštećenja centralnog nervnog sistema se ogledaju u gubitku svijesti, grčevima, gubitku pamćenja); paraliza izazvana degeneracijom ili nekrozom perifernih nerava. Tkiva međusobno posjeduju različite otpornosti. Najveću otpornost posjeduju koža i kosti, dok najmanji električni otpor imaju krvni sudovi, nervi i mišići. Najuočljivija su kožna oštećenja. Tu spadaju opekatine od prvog do četvrtog stepena. Strujni udar, pri niskom naponu i velikoj kontaktnoj površini elektrode i kože, ne stvara oštećenja na koži. U slučaju kada je dodirna površina mala, struja veća i koža suva (veliki otpor) dolazi do opekatina prvog stepena ili višeg. U slučaju da do strujnog udara dolazi pri preskoku u mrežama visokih napona, formira se električni luk, čija temperatura može biti  $3000^{\circ}\text{C}$  ili više. Njegovo termičko dejstvo izaziva teške opekatine. Kada se desi direktni strujni

udar pri visokom naponu, opekotine, osim kože, zahvataju dublje djelove organizma (pri čemu tkiva nekrotiziraju i ugljenišu se) [44–46].

➤ Dejstvo naizmjenične električne struje na čovjeka

Kada se jednosmjerna struja, koja prolazi kroz neki mišić, naglo prekine, dolazi do kontrakcije tog mišića. Ova pojava se naziva anodnim ili katodnim otvorom električnog kola (u zavisnosti od usvojenog pozitivnog polariteta struje, ukoliko se struja prekida poklapa sa referentnim pozitivnim smjerom – radi se o anodnom otvoru električnog kola). Kada se jednosmjerna struja naglo uspostavi, takođe dolazi do kontrakcije mišića. Ova pojava se naziva anodnim ili katodnim zatvorom električnog kola, u zavisnosti od polariteta struje u odnosu na usvojeni pozitivni smjer. Da bi se desila kontrakcija mišića, trenutna vrijednost struje mora preći vrijednost praga reagovanja. Kada se posmatra naizmjenična struja, sinusoidalnog oblika, zaključuje se da ona prelazi vrijednost praga reagovanja mišićnog tkiva četiri puta u jednoj periodi. Odnosno nakon prolaska struje kroz koordinatni početak, prvo dolazi do anodnog zatvora strujnog kola, zatim pri smanjenju struje ka nuli dolazi do anodnog otvora strujnog kola. Kad struja raste u suprotnom smjeru, doći će do katodnog zatvora. Na kraju, pri smanjenju struje na nultu vrijednost, dolazi do katodnog otvora strujnog kola. Ukoliko bi naizmjenična struja bila superponirana sa dovoljnim intezitetom jednosmjerne komponente, u toku jedne periode bi se desile dvije kontrakcije mišića, i to anodni zatvor i anodni otvor strujnog kruga. Prethodno objašnjenje podrazumjeva da se pozitivne vrijednosti struje usvajaju kao pozitivan referentni smjer. Pri dejstvu naizmjenične struje industrijske učestanosti ( $50\text{ Hz}$ ) dolazi do stalne kontrakcije mišića, usled preklapanja pojedinačnih kontrakcija. Tada mišić ne može da dođe u fazu relaksacije od prethodne do nove stimulacije. Granična frekvencija, nakon koje nastaje stalna kontrakcija različitih mišića, iznosi od  $20\text{ Hz}$  do nekoliko stotina  $\text{Hz}$ . Dakle, električna energija se koristi na frekvenciji koja je za organizam vrlo opasna. Struje visokih frekvencija ne izazivaju velika oštećenja organizma. Struje vrlo niskih frekvencija izazivaju samo djelimične kontrakcije, što smanjuje mogućnost trajnih oštećenja. Zbog pojave stalne kontrakcije mišića šake, lice, koje je napravilo kontakt rukom sa elementom pod opasnim naponom, ne može voljno da se odvoji od istog. U tom slučaju, povrijeđenu osobu treba odvojiti od elementa pod naponom izolacionom motkom ili nekim sličnim izolacionim predmetom, kako lice koje spašava ne bi doživjelo strujni udar. Zato je važno znati vrijednost maksimalne otpuštajuće struje (to je najveća vrijednost struje, koja protiče organizmom, pri čijoj vrijednosti lice može voljno da se odvoji od elektrode) i znati vrijednost minimalne neotpuštajuće struje (to je najmanja vrijednost struje, koja protiče organizmom, pri čijoj vrijednosti lice ne može voljno da se odvoji od elektrode). Pošto ove vrijednosti zavise od pola individue, stanja organizma, okolnosti pod kojima dolazi do strujnog udara i mnoštva drugih faktora – one se ne predstavljaju deterministički, već kumulativnom krivom vjerovatnoćom tačnosti). Ugrubo se može smatrati da je srednja vrijednost otpuštajuće struje za lica muškog pola oko  $15\text{ mA}$ , a za lica ženskog pola oko  $10\text{ mA}$ . Osim što naizmjenična struja izaziva smetnje i kontrakcije skeletnih mišića, djeluje i na srčani mišić i na njega ima najpogubniji efekat. Može izazvati smetnje, trajna oštećenja ili potpuni zastoj srca. Još jedna posledica strujnog udara na srce jeste ventrikularna fibrilacija, koja predstavlja gubitak efikasne pumpne funkcije srca usled haotičnog treperenja srčanih komora (ventrikula). Ova pojava najčešće izaziva smrt povrijeđenog, s obzirom na to da u praksi medicinska

oprema za elektro šokove nije dostupna na licu mjesta. Pojava ventrikularne fibrilacije ne prati svaki strujni udar, već ona zavisi od vrijednosti struje, njenog trajanja, raznih individualnih karakteristika organizma i okolnosti pod kojima se strujni udar dešava. Na osnovu eksperimentalnih istraživanja i iskustvenih zaključaka, došlo se do podataka koji su dati tabelom 2. Podaci se odnose na osobe prosječne tjelesne konstitucije i optimalnog zdravstvenog stanja, za slučaj električnog udara čija se struja zatvara kroz ruke, ili preko jedne ruke i noge [44–48].

Tabela 2. Posledice struja različitih efektivnih vrijednosti na čovjeka [26]

| Efektivna vrijednost struje električnog udara u [mA] | Dejstvo  |
|--|--|
| < 1  | Ne osjeća se.  |
| 1 – 9  | Blage i bezbolne reakcije. Moguća je voljna kontrakcija mišića i odvajanje od dijela pod naponom.  |
| 10 – 20  | Grčenje mišića i bolovi u ekstremitetima. Odvajanje od dijela pod naponom najčešće nije moguće. Nakon prekida proticanja struje, organizam obično ostaje bez posljedica. |
| 20 – 50  | Veliki bolovi, snažne kontrakcije mišića i otežano disanje.  |
| 50 – 100   | U slučaju dužeg djelovanja moguća ventrikularna fibrilacija srca (nepravilno kontrahovanje srčanih komora - ventrikula).   |
| 100 – 500  | Ventrikularna fibrilacija vrlo vjerovatna.   |
| > 500  | Opekotine na mjestima dodira. Opšti mišićni tonus sprečava pojavu fibrilacije.   |

Najopasniji električni udari se dešavaju kao posledica zatvaranja struja kroz čovjekovo tijelo na putu ruka – ruka i ruka – noge, pošto opasne struje prolaze kroz srce i disajne organe. Struje koje se uspostavljaju na putu noge – noge su u praksi manje opasne od prethodno pomenutih. Kao posledice strujnog udara javljaju se oštećenja nervnog sistema, krvotoka, srca i pluća. Za strujne udare nižeg napona su karakteristični simptomi grčenja i nesvjestice, dok veće promjene na koži nisu uočljive. Usled dužeg trajanja grča disajnih organa, nastupa smrt. U slučaju strujnih udara izazvanih visokim naponom, dodatno se javljaju krvarenje, uremija (pojava uree u krvi usled poremećaja rada bubrega) i vidljive opekotine po koži. Statistički podaci pokazuju da je od ukupnog broja povreda i smrtnih slučajeva nastalih usled strujnog udara, 80 % njih izazvano niskim naponom, a 20 % visokim naponom. Oko 50 % slučajeva strujnog udara se završava smrtnim ishodom, dok većina povrijedenih ostaju invalidi. Najveća zastupljenost smrtnih slučajeva je kod ljudi od 25 do 34 godine starosti [44–46].

#### ➤ Zaštita od strujnog udara

Strujni udar može nastati pri direktnom ili indirektnom dodiru djelova pod naponom. Direktan dodir podrazumjeva direktan kontakt lica sa djelovima koji su pod naponom u normalnom radnom pogonu (goli provodnik, sabirnice, noževi rastavljača i td). Indirektan dodir podrazumjeva direktan kontakt sa opremom ili elementima koji u normalnom pogonu nisu pod naponom i samo u slučaju kvara mogu doći pod napon (metalne ograde, metalna kućišta i nosači uređaja i td) [46], [49]. Zaštitne

mjere od električnog udara se mogu podijeliti na mjere lične zaštite (zaštitna sredstva) i na mjere tehničke zaštite. Mjere lične zaštite obuhvataju zaštitnu opremu (izolacioni alat i podloge, detektor napona, prenosni uređaji za lokalno uzemljavanje i kratko spajanje, izolacione ploče za pregrađivanje, oznake upozorenja i sl.) i lična zaštitna sredstva (zaštitno odijelo, šlem, zaštitne naočare, zaštitne rukavice, sigurnosni pojas, obuća sa izolacijom i sl.). Mjere tehničke zaštite obuhvataju: sniženje napona, nulovanje, zaštita automatskim isključenjem napajanja uređaja, zaštitno uzemljenje, zaštitne ograde, električno odvajanje, izolacija i sl [49], [50]. Pomenute mjere tehničke zaštite su detaljnije opisane u nastavku.

Sniženje napona je najsigurniji način zaštite od električnog udara. Najčešće se primjenjuje u vlažnim prostorijama i građevinskim područjima, gdje se uz pomoć zaštitnih transformatora standardni fazni napon od  $230\text{ V}$  snižava na vrijednosti od  $12\text{V}, 24\text{V}, 42\text{V}, 110\text{V}$  i sl. Sa sniženim naponima, može raditi ograničen broj potrošača, kao što su: rasvjeta u kupatilima ili na bazenima/gradilištima, električni alati i oprema na gradilištima. Kroz standarde i regulative se propisuju maksimalni dozvoljeni naponi za specifične situacije, čime se povećava sigurnost osoblja [49], [50].

Nulovanje predstavlja spajanje zaštitnog uzemljenja sa nultim provodnikom. Za razliku od klasičnog izvođenja zaštitnog uzemljenja (gdje se spoljašnjost elemenata i uređaja, koji u normalnom pogonu nisu pod naponom, povezuje provodnicima sa zemljom), nulovanje se razlikuje po tome što je veza ostvarena sa nultim provodnikom – mjesto zemljom). Sigurnost ljudi ogleda se u tome da će, pri kvaru uređaja, opasna struja da se zatvori preko metalnog oklopa/kućišta uređaja i nultog provodnika – a ne preko impedanse ljudskog tijela [49], [50].

Zaštita automatskim isključenjem napajanja uređaja predstavlja automatski prekid napajanja uređaja, ukoliko je mjesto kvara unutar istog. Ova mjera zaštite se najčešće primjenjuje kada je otpor uzemljenja previšok ili je izvođenje nulovanja nemoguće [49], [50].

Zaštitno uzemljenje je važno zbog zaštite lica koje, u slučaju kvara, dodiruje metalni dio opreme, koji inače nije pod naponom. Drugi razlog važnosti zaštitnog uzemljenja jeste zaštita opreme, koja se omogućava adekvatnim detektovanjem kvara i reagovanjem uređaja relejne zaštite ili osigurača. Struja kvara, koja bi se zatvorila kroz impedansu čovjeka, je prenise vrijednosti da izazove djelovanje osigurača, a dovoljno je visoka da ugrozi čovjeka. U slučaju postojanja adekvatnog uzemljenja, lice koje dotakne element (koji je kvarom došao pod napon) neće biti ugroženo – jer će se struja kvara zatvoriti nižom impedansom uzemljivača i izazvati djelovanje zaštitnih uređaja [49], [50].

Zaštitna ograda služi za fizičko onemogućavanje pristupa djelovima pod naponom elektroenergetskih postrojenja ili opremi koja je pod naponom. Njihova prednost je što su dugotrajne i lako se održavaju. Najčešće se izrađuju od željeza i drveta. Ukoliko su metalne, moraju biti propisno uzemljene [49], [50].

Električno odvajanje podrazumjeva upotrebu transformatora sa jediničnim prenosnim odnosom, čija je uloga galvansko odvajanje od mreže. Ovi transformatori nemaju uzemljenje na sekundarnoj strani, što znači da će lice koje dođe u kontakt sa jednom fazom biti bezbjedno – jer strujni krug neće imati kuda da se zatvori. Ova mjera ne štiti od strujnog udara izazvanog kontaktom lica sa dvije faze [49], [50].

Izolacija obuhvata korišćenje osnovne i dodatne izolacije provodnih djelova strujnih krugova normalnog radnog režima. Time se štiti osoblje od kontakta sa provodnim elementima, ali se i smanjuje mogućnost pojave opasnih električnih lukova (koji su opasni po osoblje). Ova mjeru

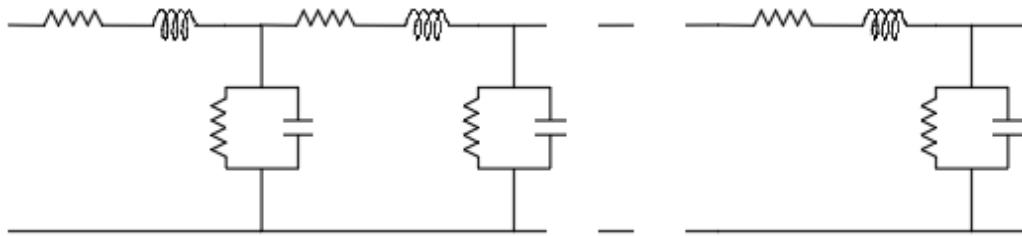
obuhvata i smještanje opreme u izolacione prostorije, kako bi se istovremena izloženost provodnih djelova, različitih uređaja, svela na minimum [49], [50].

Važno je istaći da se primjenom svih jasno propisanih procedura i regulativa, koje se odnose na zaštitne mjere od strujnog udara, garantuje izrazito visok stepen sigurnosti ljudi. Najčešći faktori koji dovode do strujnog udara su: nepridržavanje neke od zaštitnih mjera od električnog udara (ljudski faktor), neadekvatno obezbjeđivanje radnog mjesta, neadekvatno održavana oprema i/ili elementi EES-a, atmosferska pražnjenja i sl [49], [50].

## 5. Modelovanje i matematički proračun iznesenog potencijala

### 5.1 Jednačine telegrafičara

KV-ovi i NV-ovi se mogu predstaviti modelom voda sa koncentrisanim ili sa raspodijeljenim parametrima. Pri proučavanju brzih elektromagnetskih prelaznih procesa, vodovi se mogu posmatrati kao monofazni elementi sa raspodijeljenim parametrima iznad homogenog tla. Vod se šematski predstavlja kao dvoprovodnički element sastavljen iz redne veze elementarnih dionica (slika 5). Svaka od dionica kaskadne veze ima dužinu  $\Delta x$ , gdje  $\Delta x \rightarrow 0$ , kako bi model što vjerodostojnije opisao tu sekciju voda (slika 6). Što je veći broj dionica, odnosno njihova dužina manja, povećava se tačnost modela. Neka su napon i struja voda, na udaljenosti  $x$  od njegovog početka i u trenutku  $t$ , respektivno  $u(x, t)$  i  $i(x, t)$  [51].



Slika 5. Model voda prikazan kaskadnom vezom elementarnih dionica [51]

Uvode se veličine podužna impedansa i podužna admitansa, respektivno date formulama (7) i (8).

$$\underline{z} = r + j * w * l \quad (7)$$

$$\underline{y} = g + j * w * c \quad (8)$$

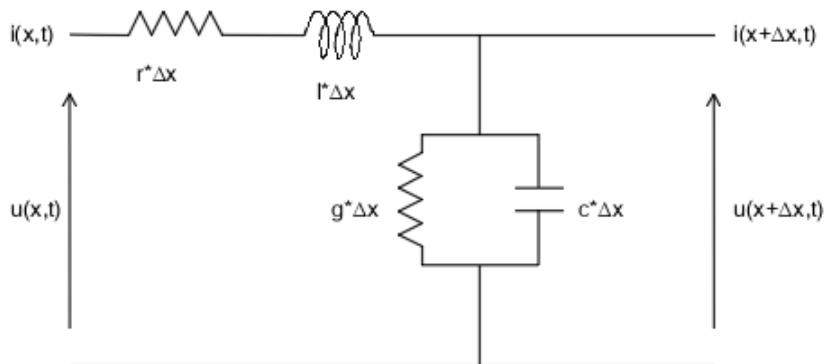
gdje je:

$r$  – podužna rezistansa

$l$  – podužna induktivnost

$g$  – podužna odvodnost

$c$  – podužna kapacitivnost.



Slika 6. Model sekcije voda sa interesnim veličinama [51]

Primjenom Kirchhoff-ih zakona<sup>6</sup> (drugog – za izraz (9), pa prvog Kirchhoff-ovog zakona – za izraz (10)) za strujno kolo sa slike 9, dobijaju se diferencijalne jednačine za podužni pad napona i struje na elementarnoj dionici voda:

$$u(x, t) - u(x + \Delta x, t) = r * \Delta x * i(x, t) + l * \Delta x * \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (9)$$

$$i(x, t) - i(x + \Delta x, t) = g * \Delta x * u(x, t) + c * \Delta x * \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (10)$$

Taylor-ov red funkcije  $f(x)$ , oko tačke  $x = a$ , se definiše beskonačnim zbirom članova, gdje svaki sabirak predstavlja izvod funkcije u pomenutoj tački (krenuvši od nultog izvoda, pa sve do  $n$ -toga). Razvoj Taylor-ovog reda funkcije  $f(x)$  oko tačke  $x = a$  se izražava na sledeći način:

$$f(x) = f(a) + f'(a) * (x - a) + \frac{f''(a)}{2!} * (x - a)^2 + \frac{f'''(a)}{3!} * (x - a)^3 + \dots \quad (11)$$

Za slučaj kada  $\Delta x \rightarrow 0$  vrši se aproksimacija Taylor-ovim redom funkcija  $f(x + \Delta x) = u(x + \Delta x, t)$  i  $f(x + \Delta x) = i(x + \Delta x, t)$  oko tačke  $x + \Delta x = x$ , pri čemu se uzimaju samo prva dva sabirka razvoja Taylor-ovog reda:

$$u(x + \Delta x, t) = u(x, t) + \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} * \Delta x \quad (12)$$

$$i(x + \Delta x, t) = i(x, t) + \frac{\partial i(x, t)}{\partial x} * \Delta x \quad (13)$$

Iz relacija (9) i (10) i na osnovu definicije limesa ( $f'(a) = \lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{f(a + \Delta x) - f(a)}{\Delta x}$ ), pri čemu je  $a = x$  i  $\Delta x = \Delta x$ ) dobijaju se sledeće dvije relacije, koje predstavljaju model voda u vremenskom domenu – odnosno jednačine telegrafičara<sup>7</sup>:

$$-\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = r * i(x, t) + l * \frac{\partial i(x, t)}{\partial t} \quad (14)$$

$$-\frac{\partial i(x, t)}{\partial x} = g * u(x, t) + c * \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \quad (15)$$

Nakon što izvršimo derivaciju relacije (14) po promjenljivoj  $x$  i derivaciju relacije (15) po promjenljivoj  $t$ , dobijamo sledeće izraze:

---

<sup>6</sup> Prvi Kirchhoff-ov zakon glasi: zbir struja koje ulaze u čvor je jednak zbiru struja koje izlaze iz tog čvora.  
Drugi Kirchhoff-ov zakon glasi: suma svih napona u konturi je jednaka nuli.

<sup>7</sup> Prvi put ih je izveo Oliver Heaviside za telegrafske vodove, te otuda naziv jednačine telegrafičara.

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} &= r * \frac{\partial i}{\partial x} + l * \frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} \\ -\frac{\partial^2 i}{\partial x \partial t} &= g * \frac{\partial u}{\partial t} + c * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} /* l \end{aligned} \right\} - \quad (16,17)$$

Sređivanjem relacija (16) i (17) i uvrštavanjem izraza (15) umjesto  $\frac{\partial i}{\partial x}$  dobija se izraz (18):

$$\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = r * g * u + (r * c + g * l) * \frac{\partial u}{\partial t} + l * c * \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} \quad (18)$$

Analogno, nakon što izvršimo derivaciju relacije (14) po promjenljivoj  $t$  i derivaciju relacije (15) po promjenljivoj  $x$ , dobijamo sledeće izraze:

$$\left. \begin{aligned} -\frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} &= r * \frac{\partial i}{\partial t} + l * \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} /* c \\ -\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} &= g * \frac{\partial u}{\partial x} + c * \frac{\partial^2 u}{\partial x \partial t} /* (-1) \end{aligned} \right\} - \quad (19,20)$$

Sređivanjem relacija (19) i (20) i uvrštavanjem izraza (14) umjesto  $\frac{\partial u}{\partial x}$  dobija se izraz (21):

$$\frac{\partial^2 i}{\partial x^2} = r * g * i + (r * c + g * l) * \frac{\partial i}{\partial t} + l * c * \frac{\partial^2 i}{\partial t^2} \quad (21)$$

U ustaljenom prostoperiodičnom režimu napon i struja se, u vremenskom domenu, predstavljaju relacijama (22) i (23):

$$u(x, t) = \sqrt{2} * U(x) * \cos(\omega * t + \theta(x)) \quad (22)$$

$$i(x, t) = \sqrt{2} * I(x) * \cos(\omega * t + \psi(x)) \quad (23)$$

Kompleksna reprezentacija napona i struje data je izrazima (24) i (25):

$$u(x, t) \rightarrow U(x) * e^{j * \theta(x)} = \underline{U}(x) = \underline{U} \quad (24)$$

$$i(x, t) \rightarrow I(x) * e^{j * \psi(x)} = \underline{I}(x) = \underline{I} \quad (25)$$

Derivacija, u kompleksnom domenu po promjenljivima  $t$  i  $x$ , prikazana je relacijama (26) i (27):

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial t} \rightarrow j * \omega * \underline{U}(x) = j\omega * \underline{U} \quad (26)$$

$$\frac{\partial u(x, t)}{\partial x} \rightarrow \frac{\partial \underline{U}(x)}{\partial x} = \frac{\partial \underline{U}}{\partial x} \quad (27)$$

Sada je omogućeno da se relacije (14) i (15) predstave u kompleksnom domenu:

$$-\frac{\partial \underline{U}}{\partial x} = (r + j\omega * l) * \underline{I} = \underline{z} * \underline{I} \quad (28)$$

$$-\frac{\partial \underline{U}}{\partial x} = (r + j\omega * l) * \underline{I} = \underline{z} * \underline{I} \quad (29)$$

Odnosno:

$$\frac{\partial^2 \underline{U}}{\partial x^2} = \underline{z} * \underline{y} * \underline{U} \quad (30)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}}{\partial x^2} = \underline{y} * \underline{z} * \underline{I} \quad (31)$$

Prehodne dvije relacije predstavljaju jednačine prostiranja. Koeficijent prostiranja definiše se na sledeći način:

$$\underline{\gamma} = \sqrt{\underline{z} * \underline{y}} = \alpha + j * \beta \quad (32)$$

gdje je  $\alpha$  i  $\beta$ , respektivno, koeficijent slabljenja i fazni koeficijent. Sada se jednačine prostiranja mogu pisati:

$$\frac{\partial^2 \underline{U}}{\partial x^2} - \gamma^2 * \underline{U} = 0 \quad (33)$$

$$\frac{\partial^2 \underline{I}}{\partial x^2} - \gamma^2 * \underline{I} = 0 \quad (34)$$

U slučaju ograničenog voda, talas će doći do njegovog kraja – što će dovesti do pojave odbijanja talasa. Zato su talasi naponi i struje na vodu superpozicija direktnog i reflektovanog talasa. Rješenja diferencijalnih jednačina prostiranja, datih izrazima (33) i (34), su:

$$\underline{U} = \underline{c}_1 * e^{-\underline{\gamma} * x} + \underline{c}_2 * e^{\underline{\gamma} * x} \quad (35)$$

$$\underline{I} = \underline{c}_3 * e^{-\underline{\gamma} * x} + \underline{c}_4 * e^{\underline{\gamma} * x} \quad (36)$$

Iz relacija (28) i (35) se dobija:

$$\underline{I} = -\frac{1}{\underline{z}} * (\underline{c}_1 * (-\underline{\gamma}) * e^{-\underline{\gamma} * x} + \underline{c}_2 * \underline{\gamma} * e^{\underline{\gamma} * x}) \quad (37)$$

$$\underline{I} = \underline{c}_1 * \frac{\underline{\gamma}}{\underline{z}} * e^{-\underline{\gamma} * x} - \underline{c}_2 * \frac{\underline{\gamma}}{\underline{z}} * e^{\underline{\gamma} * x} \quad (38)$$

Iz izraza (36) i (38) se dobija relacija (39):

$$\underline{c}_3 = \underline{c}_1 * \frac{\gamma}{\underline{z}} = \frac{\underline{c}_1}{\underline{Z}_c} \quad (39)$$

$$\underline{c}_3 = \underline{c}_1 * \frac{\gamma}{\underline{z}} = \frac{\underline{c}_1}{\underline{Z}_c} \quad (40)$$

gdje  $\underline{Z}_c$  predstavlja karakterističnu impedansu voda i definiše se:

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{\underline{z}}{\underline{y}}} \quad (41)$$

dok  $\underline{c}_1, \underline{c}_2, \underline{c}_3$  i  $\underline{c}_4$  predstavljaju integracione konstante. Zamjenom (39) i (40) u relaciju (36) dobija se:

$$\underline{U} = \underline{c}_1 * e^{-\underline{\gamma}^* x} + \underline{c}_2 * e^{\underline{\gamma}^* x} \quad (42)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{c}_1}{\underline{Z}_c} * e^{-\underline{\gamma}^* x} - \frac{\underline{c}_2}{\underline{Z}_c} * e^{\underline{\gamma}^* x} \quad (43)$$

Za vod bez gubitaka važi aproksimacija:  $(r \wedge g) \approx 0$ . Sa ovim podatkom koeficijent prostiranja i karakteristična impedansa voda respektivno izgledaju:

$$\underline{\gamma} = j\omega * \sqrt{l * c} \text{ i } \underline{Z}_c = \sqrt{\frac{l}{c}} \quad (44)$$

Napon i struja na početku voda ograničene dužine su:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{U}(0) = \underline{U}_0 \\ \underline{I}(0) = \underline{I}_0 \end{array} \right\} \text{početak voda} \quad (45,46)$$

Napon i struja na kraju voda ograničene dužine (za  $x = d$ ) su:

$$\left. \begin{array}{l} \underline{U}(d) = \underline{U}_d \\ \underline{I}(d) = \underline{I}_d \end{array} \right\} \text{kraj voda} \quad (47,48)$$

Kada se relacije za kraj voda (izrazi (47) i (48)) uvrste u relacije (42) i (43), dobija se:

$$\underline{U}_d = \underline{c}_1 * e^{-\underline{\gamma}^* d} + \underline{c}_2 * e^{\underline{\gamma}^* d} \quad (49)$$

$$\underline{I}_d * \underline{Z}_c = \underline{c}_1 * e^{-\underline{\gamma}^* d} - \underline{c}_2 * e^{\underline{\gamma}^* d} \quad (50)$$

Rješavanjem sistema jednačina (42) i (43) dobija se:

$$\underline{c}_1 = \frac{\underline{U}_d + \underline{Z}_c * \underline{I}_d}{2 * e^{-\underline{\gamma} * d}} \quad (51)$$

$$\underline{c}_2 = \frac{\underline{U}_d - \underline{Z}_c * \underline{I}_d}{2 * e^{\underline{\gamma} * d}} \quad (52)$$

Ovako izražene koeficijente  $\underline{c}_1$  i  $\underline{c}_2$  vraćamo u izraze (42) i (43), te one sada izgledaju:

$$\underline{U} = \frac{1}{2} * (\underline{U}_d + \underline{Z}_c * \underline{I}_d) * e^{\underline{\gamma} * (d-x)} + \frac{1}{2} * (\underline{U}_d - \underline{Z}_c * \underline{I}_d) * e^{-\underline{\gamma} * (d-x)} \quad (53)$$

$$\underline{I} = \frac{1}{2 * \underline{Z}_c} * (\underline{U}_d + \underline{Z}_c * \underline{I}_d) * e^{\underline{\gamma} * (d-x)} - \frac{1}{2 * \underline{Z}_c} * (\underline{U}_d - \underline{Z}_c * \underline{I}_d) * e^{-\underline{\gamma} * (d-x)} \quad (54)$$

Primjenjujući definicije hiperboličkog sinusa i kosinusa

$$\sinh(x) = \frac{e^x - e^{-x}}{2} \quad i \quad \cosh(x) = \frac{e^x + e^{-x}}{2} \quad (55)$$

na izraze (53) i (54), dobijaju se jednačine telegrafičara za slučaj ograničenog voda [51]:

$$\underline{U} = \underline{U}_d * \text{ch}(\underline{\gamma} * (d-x)) + \underline{Z}_c * \underline{I}_d * \text{sh}(\underline{\gamma} * (d-x)) \quad (56)$$

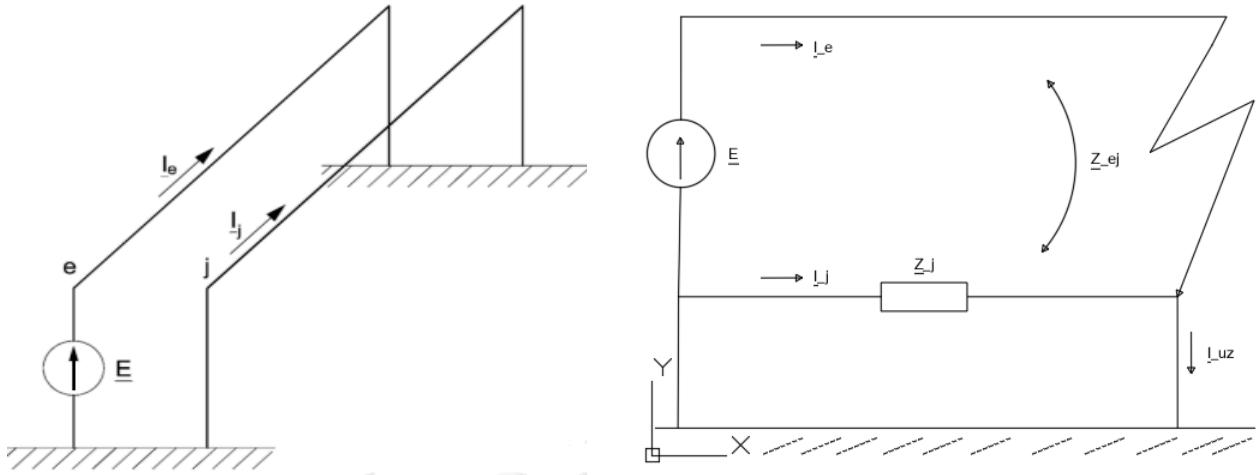
$$\underline{I} = \frac{\underline{U}_d}{\underline{Z}_c} * \text{sh}(\underline{\gamma} * (d-x)) + \underline{I}_d * \text{ch}(\underline{\gamma} * (d-x)) \quad (57)$$

## 5.2 Redukcioni faktor nadzemnog voda

Redukcioni faktor predstavlja količnik fazora struje koja se sa uzemljivača odvodi u tlo i fazora ukupne struje kvara. Redukcioni faktor pokazuje koliko puta je umanjena struja koja se sa uzemljivača odvodi u tlo u odnosu na ukupnu struju kvara, zbog prisustva drugih provodnih puteva kojima se struja kvara može zatvoriti. Odnosno:

$$r = \frac{\underline{I}_{uz}}{\underline{I}_e} \quad (58)$$

Ovako definisan redukcion faktor je u suštini faktor raspodjele struje  $S_f$  prema IEEE 80 – 2000 standardu. Na slici 7 je prikazana električna šema koju čine fazni provodnik, zaštitno uže NV-a ili metalna zaštita KV-a i zemlja. Cilj je posmatrati kojim se putevima zatvara struja kvara.



Slika 7. Konture faza (provodnik „e”) – zaštitno uže / metalna zaštita kabla (provodnik „j”) – zemlja (sjenčeni dio) [26]

Primjenom drugog Kirchhoff-ovog zakona, na konturu faza (e) – zaštitno uže (j), dobija se sledeća relacija:

$$\underline{Z}_j * \underline{I}_j + \underline{Z}_{ej} * \underline{I}_e = 0 \quad (59)$$

$$\underline{I}_j = -\frac{\underline{Z}_{ej}}{\underline{Z}_j} * \underline{I}_e \quad (60)$$

Primjenom prvog Kirchhoff-ovog zakona dobija se sledeća relacija:

$$\underline{I}_{uz} = \underline{I}_j + \underline{I}_e \quad (61)$$

Uvrštavanjem izraza (60) u izraz (61), a zatim uvrštavanjem dobijene relacije u izraz (58), dobija se:

$$r = 1 - \frac{\underline{Z}_{ej}}{\underline{Z}_j} \quad (62)$$

gdje je:

$\underline{Z}_{ej}$  – međusobna impedansa provodnika „e” i provodnika „j” u  $[\Omega]$

$\underline{Z}_j$  – impedansa provodnika „j”, koja obuhvata i rezistansu povratnog puta kroz zemlju u  $[\Omega]$ .

Impedansa  $\underline{Z}_j$ , provodnika okruglog poprečnog presjeka, predstavlja rednu vezu sledećih sabiraka:

$$\underline{Z}_j = R_{j1} * d + R_{uz} + R_{z1} * d + j\omega * \left( \frac{\mu_1}{8 * \pi} + \frac{\mu_2}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{r_j} \right) * d \quad (63)$$

gdje je:

$\omega$  – kružna učestanost [rad],  $\omega = 2 * \pi * f$

$R_{j1}$  – rezistansa provodnika „j“ po jedinici dužine u [ $\Omega/\text{km}$ ]

$d$  – dužina provodnika „j“ u [km]

$R_{uz}$  – zbir rezistansi rasprostiranja uzemljivača na krajevima provodnika „j“ u [ $\Omega$ ]

$R_{z1}$  – rezistansa zajedničkog povratnog puta kroz zemlju po jedinici dužine u [ $\Omega/\text{km}$ ]

$\frac{\mu_1}{8\pi}$  – podužna sopstvena induktivnost provodnika, koja potiče od magnetnog fluksa unutar provodnika u [ $\text{L}/\text{km}$ ]

$\frac{\mu_2}{2\pi} * \ln \frac{D_e}{r_j}$  – podužna induktivnost konture zaštitno uže/metalna zaštita kabla – zemlja u [ $\text{L}/\text{km}$ ]

$\mu_1$  i  $\mu_2$  – magnetna permeabilnost vazduha i zemlje, respektivno u [ $\text{H}/\text{m}$ ]

$D_e$  – ekvivalentno rastojanje do povratnog toka struje u tlu u [m]

$r_j$  – poluprečnik provodnika „j“ u [m].

$R_{j1}$  se računa prema sledećoj relaciji:

$$R_{j1} = \rho_u * \frac{10^3}{q_u} \quad (64)$$

gdje je:

$\rho_u$  – specifična električna otpornost provodnog dijela zaštitnog užeta u [ $\Omega * \text{mm}^2/\text{m}$ ];

$q_u$  – površina poprečnog presjeka provodnog dijela zaštitnog užeta u [ $\text{mm}^2$ ].

$R_{z1}$  se može izračunati po relaciji Karsona i Ridenberga:

$$R_{z1} = \frac{1}{4} * \mu * \pi * f = \frac{\mu * \omega}{8} \quad (65)$$

gdje je:

$\mu$  – magnetna permeabilnost tla u [ $\text{H}/\text{m}$ ].

$D_e$  se računa po Karson – Klemovoj formuli:

$$D_e = 658 * \sqrt{\frac{\rho}{f}} \quad (66)$$

gdje je:

$\rho$  – specifična električna otpornost tla u [ $\Omega * \text{m}$ ]

$f$  – frekvencija struje u [Hz].

Ako se uzme da je  $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ , slijedi:

$$\underline{Z}_j = R_j + j\omega * \left( \frac{\mu}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{0.78 * r_j} \right) * d \quad (67)$$

gdje je:

$$R_j = R_{j1} * d + R_{uz} + R_{z1} * d \quad (68)$$

Ukoliko je  $\mu = \mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$  [H/m] i  $f = 50$  [Hz], tada se dobija:

$$\underline{Z}_j = R_j + j * 0.1447 * \left( \log_{10} \frac{D_e}{0.78 * r_j} \right) * d \quad (69)$$

Impedansa  $\underline{Z}_{ej}$ , provodnika okruglog poprečnog presjeka, računa se na sledeći način:

$$\underline{Z}_{ej} = \underline{Z}_m + R_{uz} \quad (70)$$

gdje je:

$\underline{Z}_m$  – međusobna impedansa provodnika „e” i provodnika „j” usled elektromagnetne sprege u  $[\Omega]$

$R_{uz}$  – zbir rezistansi rasprostiranja uzemljivača u VNRP-u, na krajevima provodnika „j” (jer je provodnik „j” na oba kraja vezan na uzemljivače postrojenja) u  $[\Omega]$ .

Impedansa  $\underline{Z}_m$  se računa po relaciji:

$$\underline{Z}_m = R_m * d + j\omega * M * d \quad (71)$$

gdje je:

$R_m$  – međusobna podužna rezistansa konduktivne sprege između konture provodnik „e” – zemlja i konture provodnik „j” – zemlja u  $[\Omega/\text{km}]$

$M$  – međusobna podužna induktivnost provodnika „e” i provodnika „j” usled elektromagnetne sprege, odnosno međusobna podužna induktivnost elektromagnetne sprege između konture provodnik „e” – zemlja i konture provodnik „j” – zemlja u  $[\text{L}/\text{km}]$ .

$R_m$  predstavlja rezistansu zajedničkog dijela kontura provodnik „e” – zemlja i provodnik „j” – zemlja, a to je rezistansa povratnog puta kroz zemlju. Ona se računa na sledeći način:

$$R_{z1} = R_m = \frac{1}{4} * \mu * \pi * f = \frac{\mu * \omega}{8} \quad (72)$$

$M$  se računa po relaciji Karsona, uz određene aproksimacije:

$$M = \frac{\mu}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{a} \quad (73)$$

gdje je:

$a$  – rastojanje između provodnika „e” i „j” u [m].

Kada je  $\mu = \mu_0 = 4 * \pi * 10^{-7}$  [H/m], dobija se:

$$R_m = 0.0493 \quad (74)$$

$$\omega * M = 0.1447 * \log_{10} \frac{D_e}{a} \quad (75)$$

Sada se relacija (71) može pisati:

$$Z_m = \left( 0.0493 + j * 0.1447 * \log_{10} \frac{D_e}{a} \right) * d \quad (76)$$

Opšti izraz za redukcioni faktor bilo kog voda je:

$$r = \frac{R_{j1} * d + j * 0.1447 * \log_{10} \frac{a}{0.78 * r_j} * d}{R_{j1} * d + R_{uz} + R_{z1} * d + j * 0.1447 * \log_{10} \frac{D_e}{0.78 * r_j} * d} \quad (77)$$

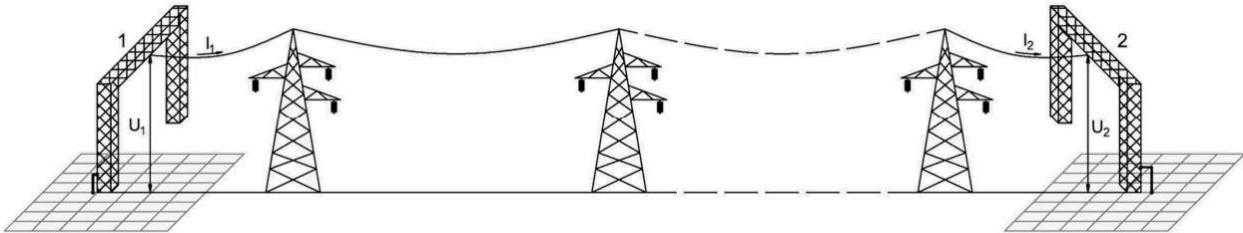
Konkretno za nadzemne vodove, parametar  $a$  iznosi:

$$a = \sqrt[3]{d_a * d_b * d_c} \quad (78)$$

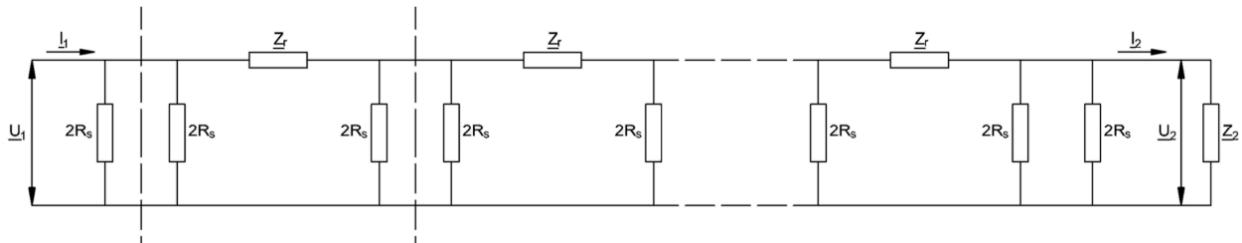
gdje su  $d_a$ ,  $d_b$  i  $d_c$  rastojanja zaštitnog užeta od provodnika faza  $a$ ,  $b$  i  $c$  [26].

### 5.3 Koeficijent iznesenog potencijala nadzemnog voda

Na slici 8 dat je prikaz zaštitnog užeta NV-a između dva postrojenja. Na slici 9 je prikazana električna zamjenska šema pomenutog zaštitnog užeta, koja se sastoji iz kaskadno vezanih „ $\pi$ ” šema.



Slika 8. NV sa zaštitnim užetom koje je vezano za uzemljivače postrojenja na oba kraja voda [26]



Slika 9. Zamjenska šema zaštitnog užeta NV-a [26]

Svaki raspon zaštitnog užeta NV-a se predstavlja četvoropolom i to „ $\pi$ ” šemom. U električnoj šemi zaštitnog užeta su zanemarene rezistanse tla između uzemljivača svaka dva stuba NV-a. Uticaj

pomenute rezistanse može se uzeti u obzir povećanjem realnog dijela impedanse  $\underline{Z}_r$ , ili povećanjem rezistanse  $R_s$ . Impedansa jednog raspona je data izrazom (79):

$$\underline{Z}_r = \underline{Z}_{r1} * d_1 [\Omega] \quad (79)$$

gdje je:

$\underline{Z}_{r1}$  – podužna impedansa zaštitnog užeta (za konturu zaštitni provodnik - zemlja) u  $[\Omega/\text{km}]$

$d_1$  – dužina jednog raspona u  $[\text{km}]$ .

Podužna impedansa se sastoji iz realnog i imaginarnog dijela:

$$\underline{Z}_{r1} = R_1 + j * X_1 \quad (80)$$

gdje je:

$R_1$  – podužna rezistansa zaštitnog užeta u  $[\Omega/\text{km}]$

$X_1$  – podužna reaktansa zaštitnog užeta u  $[\Omega/\text{km}]$ .

Za slučaj provodnika okruglog poprečnog presjeka, ove veličine su date relacijama (81) i (82):

$$R_1 = \rho_u * \frac{10^3}{q_u} \quad (81)$$

$$X_1 = \omega * \left( \frac{\mu_1}{8 * \pi} + \frac{\mu_2}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{r_u} \right) \quad (82)$$

gdje je:

$\frac{\mu_2}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{r_u}$  – podužna induktivnost konture zaštitno uže – zemlja  $[\text{L}/\text{km}]$

$r_u$  – spoljašnji poluprečnik zaštitnog užeta  $[\text{m}]$ .

S obzirom na to da se kontura zaštitno uže – zemlja nalazi u vazduhu, važi  $\mu_2 = \mu_0$ . Uvrštavanjem ovog podatka u relaciju (82) i uz  $\mu_1 = \mu_r * \mu_0$ , dobija se:

$$X_1 = 0.016 * \mu_r + 0.1447 * \log_{10} \frac{D_e}{r_u} \quad (83)$$

gdje je:

$\mu_r$  – relativna magnetna permeabilnost provodnog dijela zaštitnog užeta [26].

Na osnovu jednačina telegrafičara, iz teorije električnih kola, napon i struja na početku NV-a, u zavisnosti od napona i struje na njegovom kraju, iznose:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 * ch(n * \underline{g}) + \underline{I}'_2 * \underline{Z} * sh(n * \underline{g}) \quad (84)$$

$$\underline{I}'_1 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}} * sh(n * \underline{g}) + \underline{I}'_2 * ch(n * \underline{g}) \quad (85)$$

gdje je:

$n$  – broj raspona zaštitnog užeta

$\underline{g}$  – prenosna funkcija simetrične mreže (karakteristični parametar)  
 $\underline{Z}$  – impedansa (karakteristični parametar) [52].

Parametar  $\underline{g}$  i impedansa  $\underline{Z}$  se izračunavaju iz relacija (86) i (87):

$$\underline{g} = \ln \left( \underline{A}_{11} + \sqrt{\underline{A}_{11}^2 - 1} \right) \quad (86)$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{A}_{12}}{\sqrt{\underline{A}_{11}^2 - 1}} \quad (87)$$

gdje  $\underline{A}_{11}$  i  $\underline{A}_{12}$  predstavljaju konstante četvoropola („a” parametre) i računaju se na sledeći način:

$$\underline{A}_{11} = 1 + \frac{\underline{Z}_r}{2 * R_s} \quad (88)$$

$$\underline{A}_{12} = \underline{Z}_r \quad (89)$$

gdje je:

$R_s$  – otpornost uzemljenja stubova u  $[\Omega]$ .

Na osnovu zamjenske šeme, koja se nalazi na slici 10, slijedi:

$$I'_2 = \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}'_2} \quad (90)$$

$$\underline{Z}'_2 = \frac{2R_s * \underline{Z}_2}{2R_s + \underline{Z}_2} \quad (91)$$

Zamjenom relacije (90) u relaciju (84), dobija se:

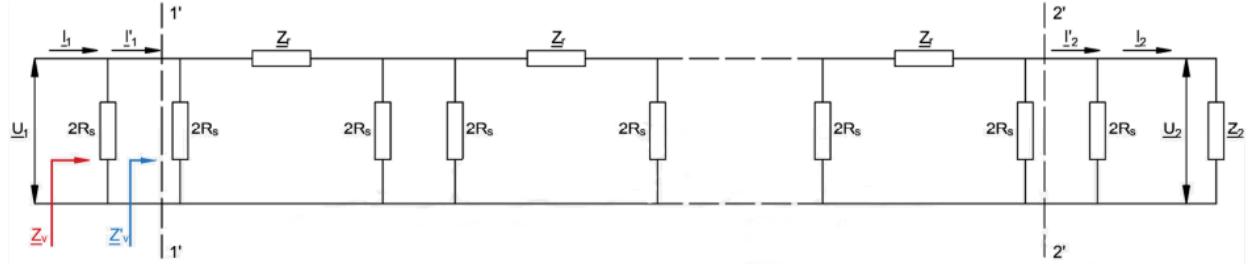
$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 * \left( ch(n * \underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} * sh(n * \underline{g}) \right) \quad (92)$$

Kako je koeficijent iznesenog potencijala odnos napona  $\underline{U}_2$  i  $\underline{U}_1$ , to iz relacije (92) slijedi [26]:

$$k_i = \left| ch(n * \underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} * sh(n * \underline{g}) \right|^{-1} \quad (93)$$

## 5.4 Ukupna impedansa zaštitnog užeta

Na slici 10 je prikazana zamjenska šema zaštitnog užeta sa ulaznim impedansama od interesa za proračun ukupne impedanse zaštitnog užeta.



Slika 10. Zamjenska šema zaštitnog užeta sa ulaznim impedansama [26]

Ulagna impedansa  $\underline{Z}_v$  (koja uključuje impedansu provodnika zaštitnog užeta i otpornost uzemljenja stubova) se računa na sledeći način:

$$\underline{Z}_v = \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_1} \quad (94)$$

Ako se u jednačine (84) i (85) uvrsti relacija (90), dobija se:

$$\underline{U}_1 = \underline{U}_2 * \left( ch(n * \underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} * sh(n * \underline{g}) \right) \quad (95)$$

$$\underline{I}'_1 = \underline{U}_2 * \left( \frac{1}{\underline{Z}} * sh(n * \underline{g}) + \frac{1}{\underline{Z}'_2} * ch(n * \underline{g}) \right) \quad (96)$$

Ako se jednačina (95) podijeli jednačinom (96), dobija se impedansa  $\underline{Z}'_v$  (slika 10):

$$\frac{\underline{U}_1}{\underline{I}'_1} = \underline{Z}'_v = \frac{ch(n * \underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} * sh(n * \underline{g})}{\frac{1}{\underline{Z}} * sh(n * \underline{g}) + \frac{1}{\underline{Z}'_2} * ch(n * \underline{g})} \quad (97)$$

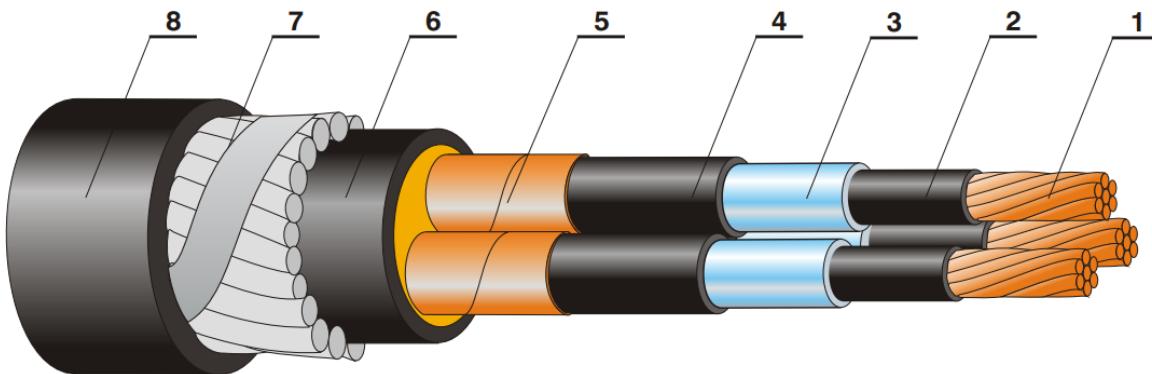
Konačna ulagna impedansa  $\underline{Z}_v$  se dobija na sledeći način [26]:

$$\underline{Z}'_v = \underline{Z} * \frac{ch(n * \underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} * sh(n * \underline{g})}{sh(n * \underline{g}) + \frac{\underline{Z}}{\underline{Z}'_2} * ch(n * \underline{g})} \quad (98)$$

$$\underline{Z}'_2 = \frac{2R_s * \underline{Z}_2}{2R_s + \underline{Z}_2} \quad (99)$$

## 5.5 Redukcioni faktor kablovskog voda

Elementi kabla, kojima se mogu iznijeti opasni naponi, su vezani za uzemljivače postrojenja i to su: električna zaštita/ekran (ograničava električno polje na unutrašnjost kabla i utiče na njegovu homogenu raspodjelu radi ravnomjernog naprezanja izolacije), metalni plašt (bezšavna metalna cijev koja štiti unutrašnjost kabla od vlage, hemijskih i mehaničkih oštećenja) i armatura (metalne trake ili žice koje pružaju mehaničku zaštitu kabla, mogu biti od feromagnetnog materijala što zahtjeva posebnu analizu). Armatura ne postoji kod svih tipova kablova, odnosno ona je opcionalni element. Pomenuti slojevi su dati na slici 11:



Slika 11. Slojevi kabla od interesa: 2 – ekran provodnika, 4 – ekran izolacije, 5 – metalni plašt i 7 – armatura [53]

KV-i mogu biti sa provodnim ili neprovodnim spoljnim omotačem. Danas su sve rjeđi primjeri kablova sa provodnim omotačem. Oni oko armature imaju izolaciju od impregnisane jute, s gornjim slojem od bitumenske mase, koja lako upija vodu. Zato, nakon nekoliko mjeseci od polaganja u tlo, dolazi do dobrog kontakta između metalnog spoljnog plašta i zemlje. Tada se ovi elementi ponašaju kao djelovi uzemljivača postrojenja na čije uzemljenje su vezani. Pr. takvih kablova je IPO 13. Sa druge strane, kablovi sa neprovodnim spoljnim omotačem (kakvi su XHP) imaju spoljnu izolaciju od polivinil hlorida (PVC-a), te provodni djelovi kabla nisu u kontaktu sa okolnim tlom. Ovi djelovi vezani su za uzemljivače postrojenja između kojih se nalazi kabl, ali nisu dio uzemljivačkog sistema [26].

U zavisnosti od prisustva armature, za kable sa neprovodnim spoljnim omotačem, razmatraju se sledeća dva slučaja:

- KV bez armature od čeličnih traka i sa metalnim plaštom od nemagnetskog materijala

Kako je plašt izuzetno tanak, zanemaruje se sopstvena podužna induktivnost provodnika od magnetnog fluksa unutar njega samog (relacija (100)). Sledеća aproksimacija jeste da je međusobno rastojanje između faznog provodnika „e“ i provodnika „j“ (odnosno metalne zaštite kabla) dovoljno malo da se može pisati:

$$\frac{\mu_1}{8 * \pi} = 0 \quad (100)$$

$$r_j \approx a \quad (101)$$

Uvrštavanjem prethodne dvije aproksimacije u izraz (77), dobija se redukcioni faktor kabla (bez armature od čeličnih traka i sa metalnim plaštom od nemagnetskog materijala):

$$\underline{r} = \frac{R_{j1} * d}{R_{j1} * d + R_{uz} + R_{z1} * d + j * 0.1447 * \log_{10} \frac{D_e}{r_j} * d} \quad (102)$$

➤ KV sa armaturom od čeličnih traka i sa metalnim plaštom od nemagnetskog materijala

Armatura može da se sastoji iz više pljosnatih čeličnih traka spiralno uvijenih oko kabla. Najčešće se koriste dvije trake, pri čemu se namotavaju jedna preko druge. Čelične trake su na krajevima uzemljene, tako što su spojene sa metalnim plaštom. Zbog prisustva armature se mijenjaju izrazi za  $\underline{Z}_j$  i  $\underline{Z}_{ej}$ .  $\underline{Z}_j$  se sada računa po sledećoj relaciji:

$$\underline{Z}_j = R_{pa} + R_{uz} + R_{z1} * d + j\omega * \left( \frac{\mu_1}{8 * \pi} + \frac{\mu_2}{2 * \pi} * \ln \frac{D_e}{r_j} \right) * d + \underline{Z}_a * d \quad (103)$$

gdje je:

$R_{pa}$  – ekvivalentna rezistansa paralelne veze plašta i armature u  $[\Omega]$

$\underline{Z}_a * d$  – impedansa koja je posljedica magnetnog uticaja armature u  $[\Omega]$ .

$R_{pa}$  se dobija iz relacije:

$$R_{pa} = \left( \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_a} \right)^{-1} \quad (104)$$

gdje je:

$R_p$  – ukupna rezistansa metalnog plašta i električne zaštite u  $[\Omega]$

$R_a$  – ukupna rezistansa armature u  $[\Omega]$ .

$R_p$  za provodnike okruglog poprečnog presjeka se računa na sledeći način:

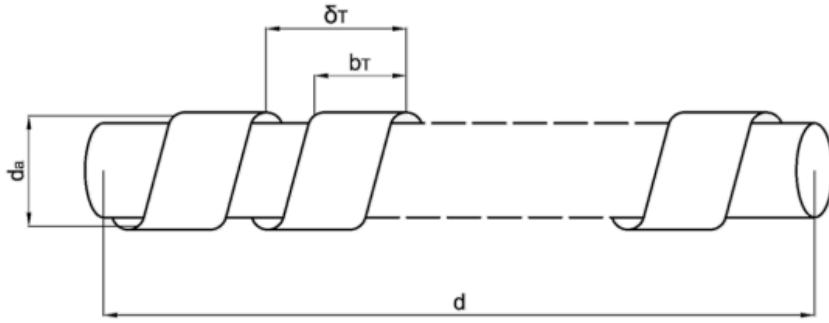
$$R_p = R_{j1} * d = \rho_u * \frac{10^3}{q_u} * d \quad (105)$$

gdje je:

$\rho_u$  – specifična električna otpornost provodnog dijela provodnika u  $[\Omega * \text{mm}^2/\text{m}]$

$q_u$  – površina poprečnog presjeka provodnog dijela provodnika u  $[\text{mm}^2]$ .

Na slici 12 su prikazane dimenzije i način postavljanja armaturne trake. Veličine sa slike definisane su u sklopu relacija (106) – (108).



Slika 12. Prikaz veličina od interesa armaturene trake [26]

$R_a$  se računa na sledeći način:

$$R_a = \rho_T * \frac{l_T}{q_T} \quad (106)$$

gdje je:

$\rho_T$  – specifična električna otpornost materijala armature u  $[\Omega * \text{mm}^2/\text{m}]$

$l_T$  – dužina trake u [m]

$q_T$  – ukupni poprečni presjek trake u  $[\text{mm}^2]$ .

$l_T$  se računa na sledeći način:

$$l_T = \pi * d_a * \frac{d}{\delta_T} \quad (107)$$

gdje je:

$d_a$  – srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake u  $[\text{mm}^2]$

$d$  – dužina kabla u [m]

$\delta_T$  – korak uvijanja trake u [mm].

$q_T$  se računa na sledeći način:

$$q_T = n * b_T * d_T \quad (108)$$

gdje je:

$n$  – broj traka

$b_T$  – širina trake u [mm]

$d_T$  – debljina trake u [mm].

Impedansa  $Z_a * d$  u izrazu za  $Z_j$  je posljedica magnetnog uticaja armature i zavisi od vrijednosti magnetnog polja koje se uspostavlja u armaturi. Odnosno, magnetno polje u armaturi (indukovano od strane nesimetričnih faznih struja i struje metalnog plašta, u toku kvara) indukuje struje u metalnoj električnoj zaštiti. Preciznije, struja koja stvara magnetno polje u armaturi jednaka je razlici fazne struje (struje kvara) i struje koja teče kroz metalni plašt kabla. Iz Ampère-ovog zakona slijedi:

$$H = \frac{I}{2 * \pi * r} \quad (109)$$

gdje je:

$H$  – jačina magnetnog polja [ $A/m$ ]

$I$  – intezitet struje obuhvaćene zamišljenom kružnom konturom [ $A$ ]

$r$  – poluprečnik te konture [m].

Ako je  $I_f$  struja kvara koja teče fazom/fazama i  $I_k$  struja koja teče kroz metalni plašt kabla, a  $d_a$  prečnik zamišljene kružne konture, na osnovu Ampère-ovog zakona važi:

$$\underline{H}_a = \frac{I_f - I_k}{\pi * d_a} = \frac{\underline{I}_{uz}}{\pi * d_a} \quad (110)$$

Magnetna permeabilnost je fizička veličina koja opisuje sposobnost materijala da usmjerava i pojačava magnetno polje unutar sebe. Ona nije konstantna kod feromagnetičnih materijala, već zavisi od jačine magnetnog polja. Za dalji proračun, uvodi se kompleksna magnetna permeabilnost:

$$\underline{\mu}_a = \mu'_a - j * \mu''_a \quad (111)$$

gdje je:

$\mu'_a$  – predstavlja induktivni uticaj armature u [ $H/m$ ]

$\mu''_a$  – predstavlja histerezisne gubitke i gubitke u armaturi usled vrtložnih struja u [ $H/m$ ].

I realni i imaginarni dio zavise od jačine magnetnog polja. Vrijednosti magnetne permeabilnosti se dobijaju eksperimentalno, a zatim prikazuju grafički. Kompleksni magnetni fluks kroz armaturu se računa po sledećoj relaciji:

$$\underline{\phi}_a = \iint B * dS = \frac{l_T}{\delta_T} * \underline{\mu}_a * \underline{H}_a * q_T [\text{Wb}] \quad (112)$$

gdje je:

$\frac{l_T}{\delta_T}$  – broj namotaja formiranih armaturnom trakom.

Iz definicije impedanse slijedi:

$$Z = \frac{e(t)}{i(t)} = \frac{\frac{d\phi(t)}{dt}}{i(t)} \rightarrow \underline{Z} = \frac{j\omega * \underline{\phi}}{I} \quad (113)$$

Shodno definiciji impedanse,  $\underline{Z}_a * d$  je data izrazom:

$$\underline{Z}_a * d = \frac{j\omega * \underline{\phi}_a}{I_{uz}} \quad (114)$$

Uvrštavanjem relacija (110), (111) i (112) u relaciju (114), dobija se:

$$\underline{Z}_a * d = j * \underline{\mu}_a * \frac{\omega}{\pi * d_a} * n * b_T * d_T * \frac{l_T}{\delta_T} \quad (115)$$

$$\underline{Z}_a * d = r_a * d + j * x_a * d \quad (116)$$

Pri čemu su:

$$r_a = \mu_a'' * \frac{\omega}{\pi * d_a * \delta_T} * n * b_T * d_T \quad (117)$$

$$x_a = \mu_a' * \frac{\omega}{\pi * d_a * \delta_T} * n * b_T * d_T \quad (118)$$

Uvrštavanjem odgovarajućih izraza u relaciju (62) i uz aproksimaciju datu relacijom (101), iz istih razloga – dobija se:

$$\underline{r} = \frac{R_{pa}}{R_{pa} + R_{uz} + R_{z1} * d + r_a * d + j * 0.1447 * \log_{10} \frac{D_e}{r_j} * d + j * x_a * d} \quad (119)$$

Problem koji se javlja pri prethodnom proračunu redukcionog faktora je određivanje efektivne vrijednosti jačine magnetnog polja. Iz relacije (110) se uočava da je za njegovo određivanje neophodno znati efektivnu vrijednost struje koja se sa uzemljivača odvodi u zemlju. Tu struju dobijamo iz sledeće relacije:

$$\underline{I}_{uz} = \underline{r} * \underline{I}_f \quad (120)$$

Međutim, za određivanje struje koja se sa uzemljivača odvodi u zemlju, neophodno je poznavati redukcioni faktor. Dolazi se do problema: za određivanje vrijednosti redukcionog faktora potrebno je imati vrijednost redukcionog faktora. Ovaj problem se prevazilazi tako što se za kable sa armaturom od čeličnih traka, određenih konstruktivnih karakteristika, odredi zavisnost redukcionog faktora od struje kvara, tj:

$$r = f(I_f) \quad (121)$$

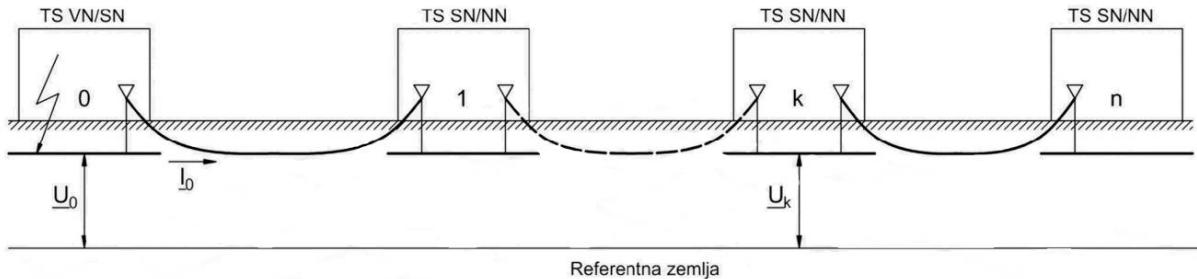
Prvo se prepostavi proizvoljna vrijednost polja  $\underline{H}_a$ , za koju se izračuna redukcionii faktor  $r$  (po prethodno navedenim relacijama, uz određivanje permeabilnosti  $\mu_a'$  i  $\mu_a''$  sa eksperimentalno dobijenih grafika). Zatim se iz sledećeg izraza odredi struja  $I_f$ :

$$\underline{H}_a = \frac{\underline{I}_{uz}}{\pi * d_a} = \frac{\underline{r} * \underline{I}_f}{\pi * d_a} \rightarrow I_f = \left| \underline{H}_a * \frac{\pi * d_a}{r} \right| \quad (122)$$

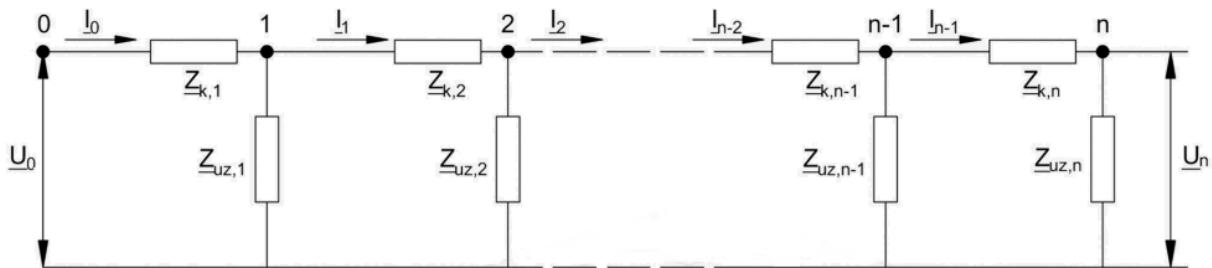
Tako je dobijena jedna vrijednost funkcije  $r = f(I_f)$ . Postupak se ponavlja za ostale praktične vrijednosti  $\underline{H}_a$ . Za kabl drugačijih konstruktivnih karakteristika, postupak bi se odradio nanovo [26].

## 5.6 Koeficijent iznesenog potencijala kablovskog voda

Na slici 13 prikazan je KV sa neprovodnim spoljnim omotačem, koji povezuje jednu napojnu TS-u visoki na srednji napon sa više, redno vezanih, distributivnih TS-a srednji na niski napon. Dakle, kabl je radijalan. Na slici 14 je prikazana električna zamjenska šema električne zaštite, metalnog plašta i armature KV-a.



Slika 13. KV sa neprovodnim spoljnim omotačem koji napaja nekoliko TS-a [26]



Slika 14. Zamjenska šema metalnih zaštita KV-a [26]

Zarad jednostavnije analize, usvajaju se dvije prepostavke. Prva je da su impedanse uzemljenja TS-a srednji na niski napon međusobno jednake. Ova prepostavka je opravdana jer se uzemljivači pomenutih TS-a izvode na isti način, ukoliko je specifična električna otpornost tla, kod svake od njih, približno ista). Prva prepostavka data je relacijom (123):

$$\underline{Z}_{uz,1} = \underline{Z}_{uz,2} = \dots = \underline{Z}_{uz,n} = \underline{Z}_{uz} \quad (123)$$

gdje je:

$\underline{Z}_{uz,1}$  – impedansa uzemljenja prve TS-e u  $[\Omega]$ .

Druga prepostavka jeste da su rastojanja između TS-a približno ista. U praksi, najčešće nije tako, ali se za potrebe proračuna uzima srednja vrijednost. Karakteristike kabla su iste na svim dionicama<sup>8</sup>. Druga prepostavka data je relacijom (124):

$$\underline{Z}_{k,1} = \underline{Z}_{k,2} = \dots = \underline{Z}_{k,n} = \underline{Z}_k \quad (124)$$

gdje je:

$\underline{Z}_{k,1}$  – impedansa prve dionice kabla u  $[\Omega]$ .

<sup>8</sup> Dionica je dio kabla između dvije susjedne TS-e.

Podužna impedansa  $\underline{Z}_k$  se sastoji iz realnog i imaginarnog dijela:

$$\underline{Z}_k = (r + j \cdot x) \cdot d \quad (125)$$

gdje je:

$r$  – redna podužna rezistansa provodnih zaštita kabla u  $[\Omega/\text{km}]$

$x$  – redna podužna reaktansa provodnih zaštita kabla u  $[\Omega/\text{km}]$

$d$  – dužina jedne kablovske dionice u  $[\text{km}]$ .

$r$  se računa pomoću sledećeg izraza:

$$r = R_{pa,1} + r_a \quad (126)$$

gdje je:

$R_{pa,1}$  – ekvivalentna podužna rezistansa metlnih zaštita kabla i armature (ako armatura postoji) u  $[\Omega/\text{km}]$

$r_a$  – podužna rezistansa metlnih zaštita kabla i armature (ako armatura postoji), koja potiče od magnetnog uticaja armature u  $[\Omega/\text{km}]$ .

$R_{pa,1}$  se računa iz sledeće relacije:

$$R_{pa,1} = \frac{R_{pa}}{d} = \frac{1}{d} * \left( \frac{1}{R_p} + \frac{1}{R_a} \right)^{-1} \quad (127)$$

gdje je:

$R_p$  – ukupna rezistansa metalnih zaštita kabla u  $[\Omega]$

$R_a$  – ukupna rezistansa armature u  $[\Omega]$ .

$x$  se računa po sledećoj relaciji:

$$x = X_{k,1} + x_a \quad (128)$$

gdje je:

$X_{k,1}$  – podužna induktivna reaktansa metalnih zaštita kabla i armature (ako armatura postoji) u  $[\Omega/\text{km}]$

$x_a$  – podužna induktivna reaktansa metalnih zaštita kabla i armature (ako armatura postoji), koja potiče od magnetnog uticaja armature u  $[\Omega/\text{km}]$ .

$X_{k,1}$  se računa po sledećoj relaciji:

$$X_{k,1} = \frac{X_k}{d} = \frac{1}{d} * \left( 0.1447 \cdot \log_{10} \frac{D_e}{r_k} \right) \quad (129)$$

gdje je:

$r_k$  – poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalnog plašta u  $[\text{m}]$ .

Kaskadna veza dionica kabla se modeluje „T” četvoropolima, pa se parametri mogu prilagoditi „π” četvoropolima. Pomenuti korak je potreban zbog korišćenja jednačina telegrafičara, u kojima su parametri  $\underline{g}$  i  $\underline{Z}$  izvedeni za „π” šemu. Zavisnost između ulaznih i izlaznih naponi i struja data je relacijama:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n * ch(n * \underline{g}) + \underline{I}_n * \underline{Z} * sh(n * \underline{g}) \quad (130)$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}} * sh(n * \underline{g}) + \underline{I}_n * ch(n * \underline{g}) \quad (131)$$

Parametar  $\underline{g}$  i impedansa  $\underline{Z}$  se izračunavaju iz relacija (132) i (133):

$$\underline{g} = \ln \left( 1 + \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \sqrt{2 * \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} + \left( \frac{\underline{Z}_1}{\underline{Z}_2} \right)^2} \right) \quad (132)$$

$$\underline{Z} = \frac{\underline{Z}_2}{\sqrt{2 * \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1} + 1}} \quad (133)$$

gdje je:

$\underline{Z}_1$  – redna impedansa dionice kabla (za konturu metalna zaštita - zemlja) u [km]

$\underline{Z}_2$  – otočna impedansa dionice kabla (za konturu metalna zaštita - zemlja) u [km].

Uvrštavanjem podatka  $\underline{I}_n = 0$  u jednačine (130) i (131), dobija se:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n * ch(n * \underline{g}) \quad (134)$$

$$\underline{I}_0 = \frac{\underline{U}_n}{\underline{Z}} * sh(n * \underline{g}) \quad (135)$$

Iz jednačine (134) dobija se koeficijent iznesenog potencijala za n-tu TS-u :

$$k_{i,n} = \frac{\underline{U}_n}{\underline{U}_0} = \left| ch(n * \underline{g}) \right|^{-1} \quad (136)$$

Koeficijent  $k_i$  za  $k$ -tu TS-u se dobija kada se iskoriste relacija (130) i relacija (130) – napisana tako da je početak kabla  $k$ -ta, a kraj  $n$ -ta TS-a. Sve to, uz uslov da je  $\underline{I}_n = 0$ , daje [26]:

$$\underline{U}_0 = \underline{U}_n * ch(n * \underline{g}) \rightarrow \underline{U}_n = \frac{\underline{U}_0}{ch(n * \underline{g})} \quad (137)$$

$$\underline{U}_k = \underline{U}_n * ch((n - k) * \underline{g}) \quad (138)$$

$$k_{i,k} = \frac{U_k}{U_0} = \left| \frac{ch((n-k) * \underline{g})}{ch(n * \underline{g})} \right| \quad (139)$$

### 5.7 Ukupna impedansa metalnih zaštita kabla

$\underline{Z}_k$  predstavlja impedansu električne zaštite kabla sa neprovodnim spoljnim omotačem, metalnog plića i armature (ukoliko postoji), kao i impedansu uzemljenja svih pomenutih elemenata. Računa se tako što se relacija (130) podijeli relacijom (131), uz uslov da je  $\underline{I}_n = 0$ , [26]:

$$\underline{Z}_k = \frac{\underline{U}_0}{\underline{I}_0} = \underline{Z} * cth(n * \underline{g}) \quad (140)$$

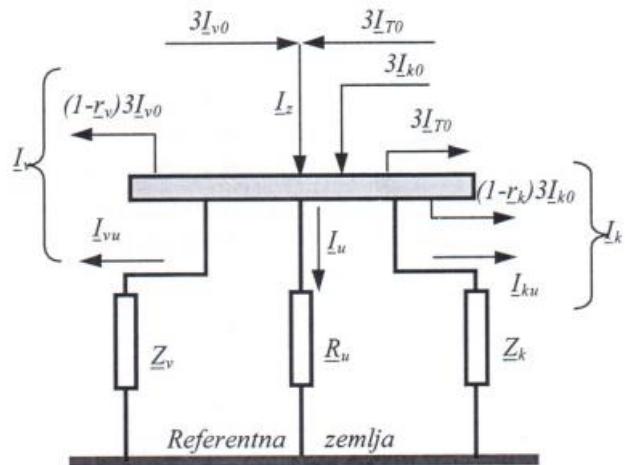
### 5.8 Napon uzemljivača postrojenja pogodenog kvarom i izneseni naponi

Struja, koja će se iznijeti zaštitnim užetom NV-a i/ili metalnim zaštitama KV-a (respektivno, lijeve strane relacija (141) i (142)), sačinjena je od nultih komponenti struje kvara svake faze (fizički to je dio struje kvara koji odlazi u tlo i dat je prvim sabircima pomenutih relacija), umanjen za struju koja će uzemljivačem postrojenja oteći u lokalno tlo (drugi sabirci pomenutih relacija) i uvećana za vrijednost struje koja se javlja kao posledica dolaska uzemljivača postrojenja pod napon (treći sabirci pomenutih relacija). Odnosno:

$$\underline{I}_v = 3 * \underline{I}_{v0} - \underline{r}_v * 3 * \underline{I}_{v0} + \underline{I}_{vp} \quad (141)$$

$$\underline{I}_k = 3 * \underline{I}_{k0} - \underline{r}_k * 3 * \underline{I}_{k0} + \underline{I}_{kp} \quad (142)$$

Na osnovu prvog Kirchhoff-ovog zakona, za čvor sa slike 15, slijedi:



Slika 15. Raspodjela struje zemljospaja u postrojenju [26]

$$0 = \underline{I}_{uz} + \underline{I}_v + \underline{I}_k + 3 * \underline{I}_{T0} - 3 * \underline{I}_{T0} - 3 * \underline{I}_{v0} - 3 * \underline{I}_{k0} \quad (143)$$

gdje je:

$\underline{I}_{uz}$  – struja kvara koja se sa uzemljivača odvodi u zemlju u [A]

$3 * \underline{I}_{T0}$  – struja kvara koja se zatvara kroz zvjezdiste transformatora u [A].

Kada se relacije (141) i (142) uvrste u jednačinu (143), dobija se:

$$\underline{I}_{uz} = \underline{r}_v * 3 * \underline{I}_{v0} + \underline{r}_k * 3 * \underline{I}_{k0} - \underline{I}_{vp} - \underline{I}_{kp} \quad (144)$$

Dio struja, koje se iznose zaštitnim užadima NV-ova i metalnim zaštitama KV-ova i posledica su dolaska uzemljivača VNRP-a pod napon, računaju se na sledeći način:

$$\underline{I}_{vp} = \frac{\underline{U}_{uz}}{\underline{Z}_v} \quad (145)$$

$$\underline{I}_{kp} = \frac{\underline{U}_{uz}}{\underline{Z}_k} \quad (146)$$

gdje je:

$\underline{U}_{uz}$  – napon uzemljivača postrojenja pogodenog kvarom u [V].

Uvrštavanjem izraza (145) i (146) u relaciju (144), dobija se:

$$\underline{I}_{uz} = \underline{r}_v * 3 * \underline{I}_{v0} + \underline{r}_k * 3 * \underline{I}_{k0} - \underline{U}_{uz} * \left( \frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right) \quad (147)$$

$\underline{U}_{uz}$  je, po Omovom zakonu, jednak:

$$\underline{U}_{uz} = R_{uz} * \underline{I}_{uz} \quad (148)$$

gdje je:

$R_{uz}$  – rezistansa uzemljivača postrojenja u [ $\Omega$ ].

Uvrštavanjem relacije (148) u (147), dobija se:

$$\underline{I}_{uz} = \frac{\underline{r}_v * 3 * \underline{I}_{v0} + \underline{r}_k * 3 * \underline{I}_{k0}}{1 + R_{uz} * \left( \frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)} \quad (149)$$

Uvrštavanjem relacije (149) u (148), dobija se:

$$\underline{U}_{uz} = R_{uz} * \frac{\underline{r}_v * 3 * \underline{I}_{v0} + \underline{r}_k * 3 * \underline{I}_{k0}}{1 + R_{uz} * \left( \frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)} \quad (150)$$

Nakon sređivanja relacije (150) se dobija fazor napona uzemljivača, u slučaju kada iz postrojenja polaze jedan NV i jedan KV:

$$\underline{U}_{uz} = (\underline{r}_v * 3 * \underline{I}_{v0} + \underline{r}_k * 3 * \underline{I}_{k0}) * \underline{Z}_e \quad (151)$$

Pri čemu je:

$$\underline{Z}_e = \left( \frac{1}{R_{uz}} + \frac{1}{\underline{Z}_v} + \frac{1}{\underline{Z}_k} \right) \quad (152)$$

Analogno relaciji (150), za slučaj proizvoljnog broja NV-ova i KV-ova (koji polaze iz postrojenja), koriste se sledeće relacije za izračunvanje struje i napona uzemljivača:

$$\underline{I}_{uz} = \frac{3 * \sum_{i=1}^n \underline{r}_i * \underline{I}_{j0}}{1 + R_{uz} * \sum_{i=1}^n \frac{1}{\underline{Z}_i}} \quad (153)$$

$$\underline{U}_{uz} = 3 * \sum_{i=1}^n \underline{r}_i * \underline{I}_{j0} * \underline{Z}_e \quad (154)$$

Indeks  $i$  označava, prethodno objašnjene, veličine i-tog voda. Ukoliko je, u slučaju kabla, plastično neuzemljen na oba kraja – tada je  $\underline{r}_i = 1$ . Ukoliko, unutar kabla, postoji izolacioni umetak – tada je  $\underline{Z}_i \rightarrow \infty$ . Izneseni napon dobija se tako što se napon uzemljivača postrojenja pogodjenog kvarom pomnoži sa odgovarajućim koeficijentom iznesenog potencijala [26]:

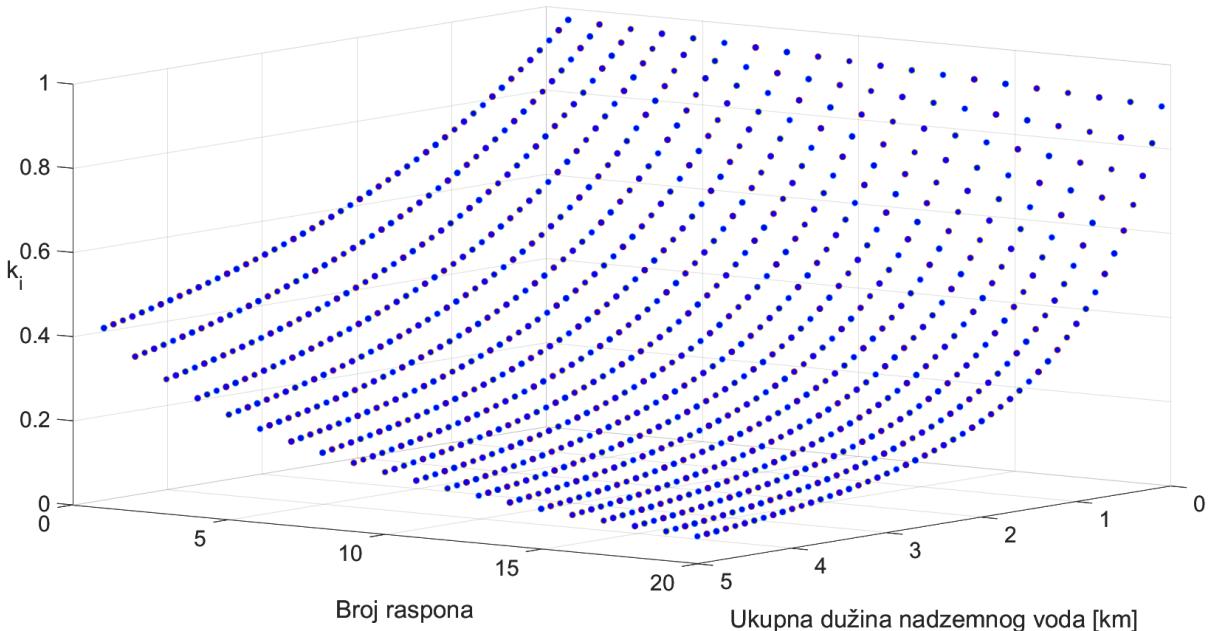
$$\underline{U}_j = \underline{U}_{uz} * k_{v/k} \quad (155)$$

## 6. Proračun iznesenog potencijala i analiza rezultata

U ovom poglavlju dati su rezultati proračuna koeficijenata iznesenog potencijala, redukcionih faktora i iznesenih napona (odnosno iznesenih potencijala, u odnosu na nulti referentni potencijal zemlje) za različite vrijednosti, jednog ili više, uticajnih parametara. Takođe, izvršena je analiza rezultata.

### 6.1 Koeficijent iznesenog potencijala i redukciono faktor nadzemnog voda

U cilju analize zavisnosti koeficijenta iznesenog potencijala NV-a u funkciji broja raspona i ukupne dužine, posmatra se slučaj iznošenja potencijala iz VNRP-a u kom se dogodio kvar ka zemlji. Analiza je sprovedena nad jednim NV-om sledećih karakteristika: 35 kV, aluminijumska zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ . Na slici 16 se uočava da koeficijent iznesenog potencijala NV-a eksponencijalno opada sa povećanjem broja raspona, i to drastično brže za velike dužine voda. Takođe, pomenuti koeficijent eksponencijalno opada sa povećanjem ukupne dužine voda, i to drastično brže za vodove sa velikim brojem raspona.



Slika 16. Koeficijent iznesenog potencijala NV-a u zavisnosti od broja raspona i njegove ukupne dužine

U cilju praćenja promjena redukcionog faktora (određenog NV-a) sa promjenom naponskog nivoa, posmatra se NV sledećih karakteristika: aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , specifična otpornost zemljišta  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura  $25^\circ\text{C}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ , rezistansa uzemljenja TS-e u kojoj se desio kvar je  $1 \Omega$ , poluprečnik zamišljenog provodnika konture koju čine redna veza zaštitnog užeta i zemlje je  $0.05 \text{ m}$ . Za svaki

naponski nivo uvažena su rastojanja svakog faznog provodnika od zaštitnog užeta. Pomenuta rastojanja zavise od dimenzija stubova, koji se razlikuju za različite naponske nivoe. Za sledeći grafik korišćena su sledeća rastojanja faznih provodnika od zaštitnog užeta:

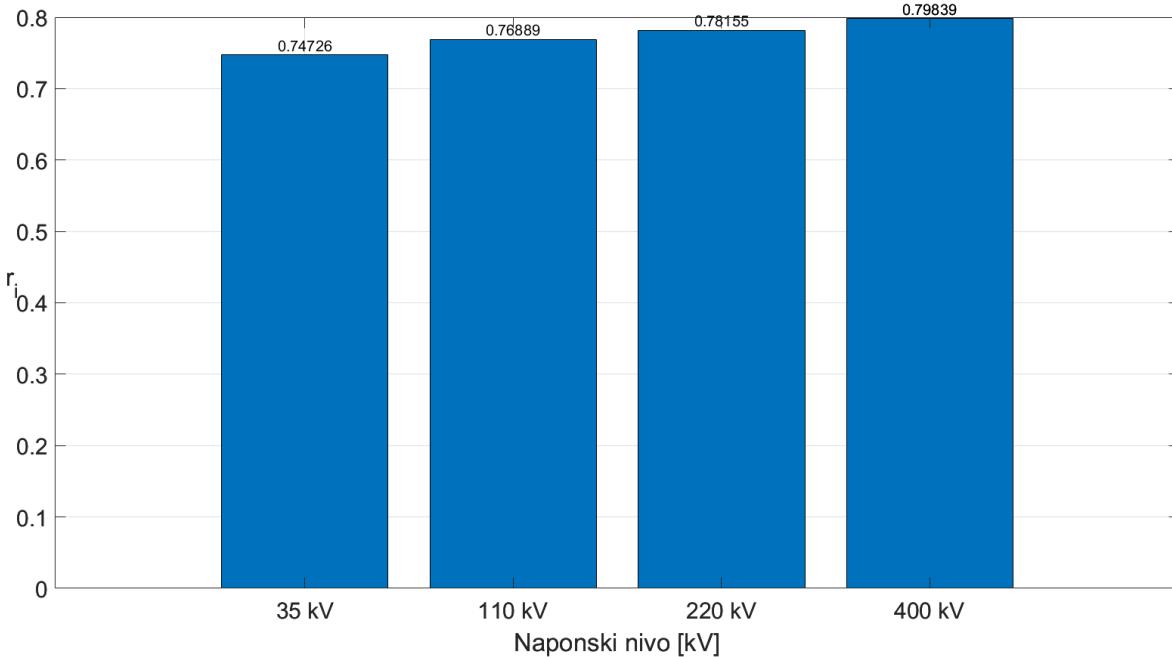
$$35 \text{ kV}: \quad 110 \text{ kV}: \quad 220 \text{ kV}: \quad 400 \text{ kV}: \quad (156)$$

$$d_a = 1.9 \text{ [m]} \quad d_a = 4.8 \text{ [m]} \quad d_a = 9.54 \text{ [m]} \quad d_a = 14.54 \text{ [m]} \quad (157)$$

$$d_b = 3.9 \text{ [m]} \quad d_b = 6.8 \text{ [m]} \quad d_b = 8.78 \text{ [m]} \quad d_b = 13.78 \text{ [m]} \quad (158)$$

$$d_c = 5.9 \text{ [m]} \quad d_c = 8.8 \text{ [m]} \quad d_c = 9.54 \text{ [m]} \quad d_c = 14.54 \text{ [m]} \quad (158)$$

Na slici 17 su prikazane efektivne vrijednosti redukcionih faktora NV-a za različite naponske nivoe.

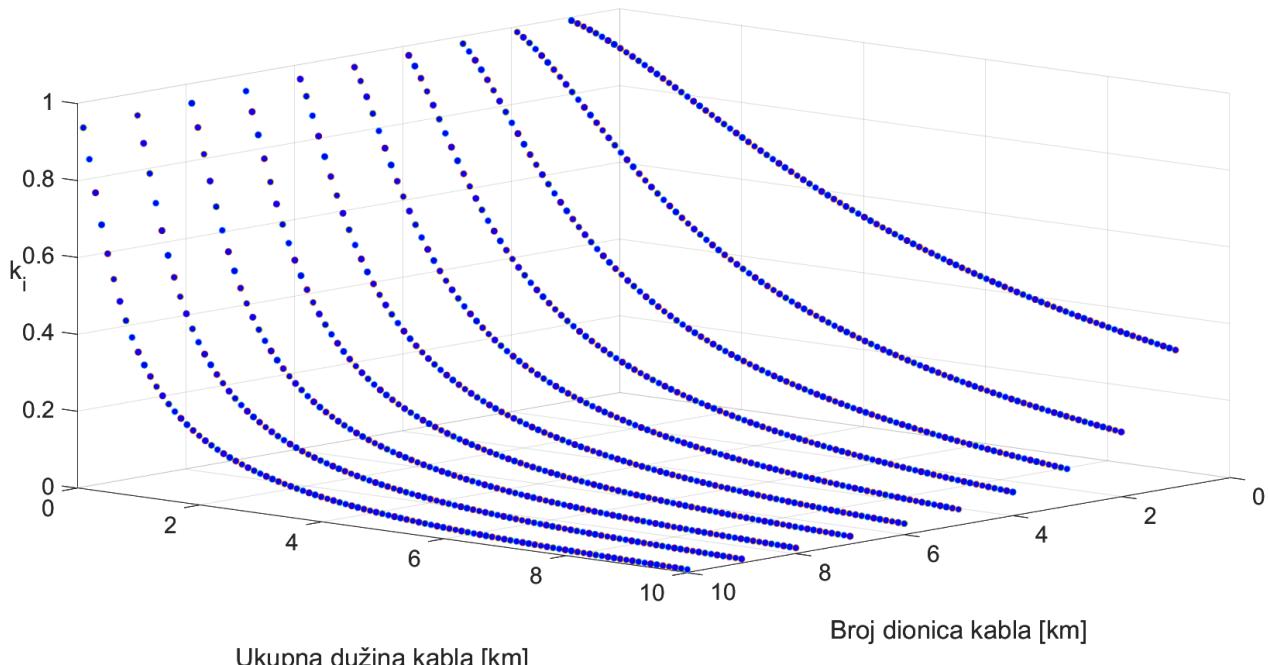


Slika 17. Efektivna vrijednost redukcionog faktora NV-a u zavisnosti od naponskog nivoa

## 6.2 Koeficijent iznesenog potencijala i redukcionii faktor kablovskog voda

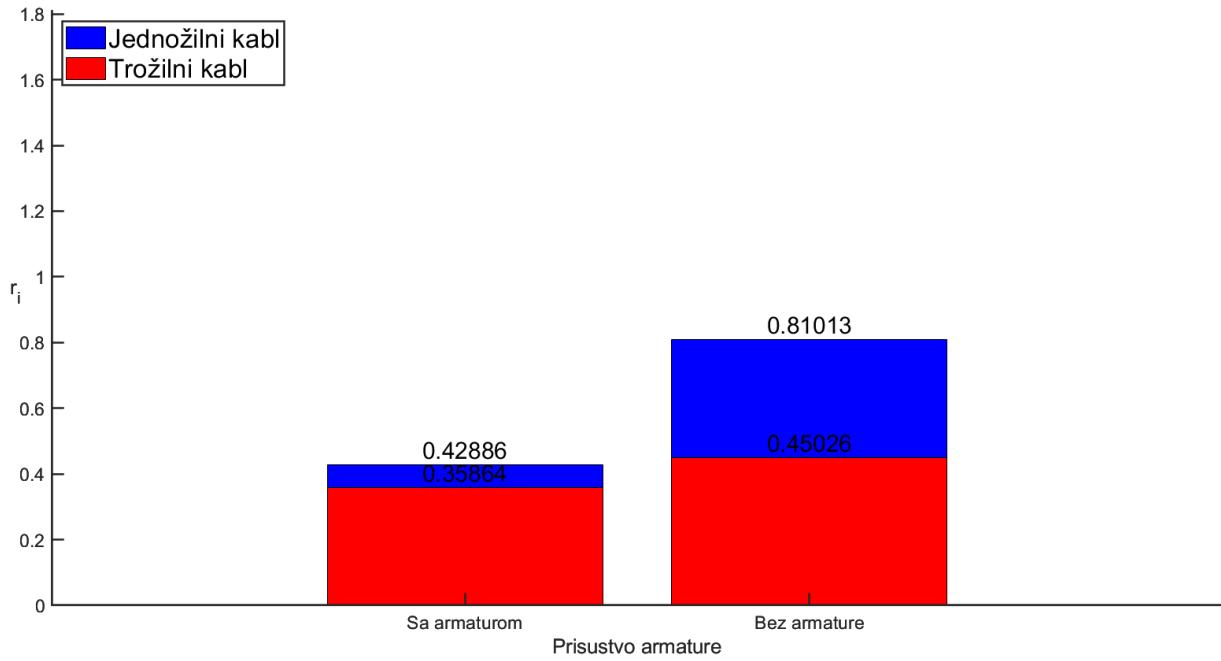
U cilju analize zavisnosti koeficijenta iznesenog potencijala KV-a u funkciji broja dionica i ukupne dužine, posmatra se slučaj iznošenja potencijala iz VNRP-a u kom se dogodio kvar ka zemlji. Analiza je sprovedena nad jednim KV-om sledećih karakteristika: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , poluprečnik provodnika metalne zaštite, armature i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, rezistansa TS-e pogodene kvarom je  $2 \Omega$ , efektivna vrijednost impedansi susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, debljina jedne trake je 1 mm. Na slici 18 se uočava da koeficijent iznesenog potencijala KV-a eksponencijalno opada sa povećanjem broja

dionica, s tim da su njegove vrijednosti znatno veće za kraće kablove. Takođe, pomenuti koeficijent eksponencijalno opada sa povećanjem ukupne dužine kabla, s tim da su njegove vrijednosti znatno veće za kablove sa malim brojem dionica.



Slika 18. Koeficijent iznesenog potencijala do poslednje TS-e KV-a u zavisnosti od broja dionica i njegove ukupne dužine

U cilju analize redupcionog faktora KV-a u funkciji broja njegovih žila i prisustva armature, sproveden je proračun za sledeće kablove: trožilni - XHE 49/24 3x120/16  $\text{mm}^2$  6/10/12 kV i jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16  $\text{mm}^2$  6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $16 \text{ mm}^2$ , specifična otpornost zemljišta je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , poluprečnik provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.002 \text{ m}$ , ukupna dužina KV-a je  $3 \text{ km}$ , ukupan broj dionica je  $10$ , nulta komponenta struje kvara je  $200 - j * 2000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 \text{ mm}$ , korak uvijanja trake je  $30 \text{ mm}$ , broj traka je  $2$ , širina trake je  $9 \text{ mm}$ , debljina jedne trake je  $1 \text{ mm}$ . Na slici 19 se uočava da efektivna vrijednost redupcionog faktora KV-a ima znato veće vrijednosti bez prisustva armature, za jednožilni kabl. U slučaju trožilnog kabla, redupcioni faktori jesu viši kada nema armature (ali ne toliko koliko u slučaju jednožilnog kabla). Armatura predstavlja još jedan odvodni put struje kvara, pa se zaključuje da njeno odsustvo povećava dio struje kvara koja se direktno sa uzemljivača postrojenja odvodi u tlo. Kao posledica toga, javljaju se viši naponi uzemljivača TS-e pogodene kvarom (negoli kada je armatura prisutna). Trožilnim kablom se obično može iznijeti veća vrijednost struje kvara iz postrojenja, zbog povećane mase električne zaštite i armature, pa je time redupcioni faktor trožilnog kabla niži, negoli jednožilnog.

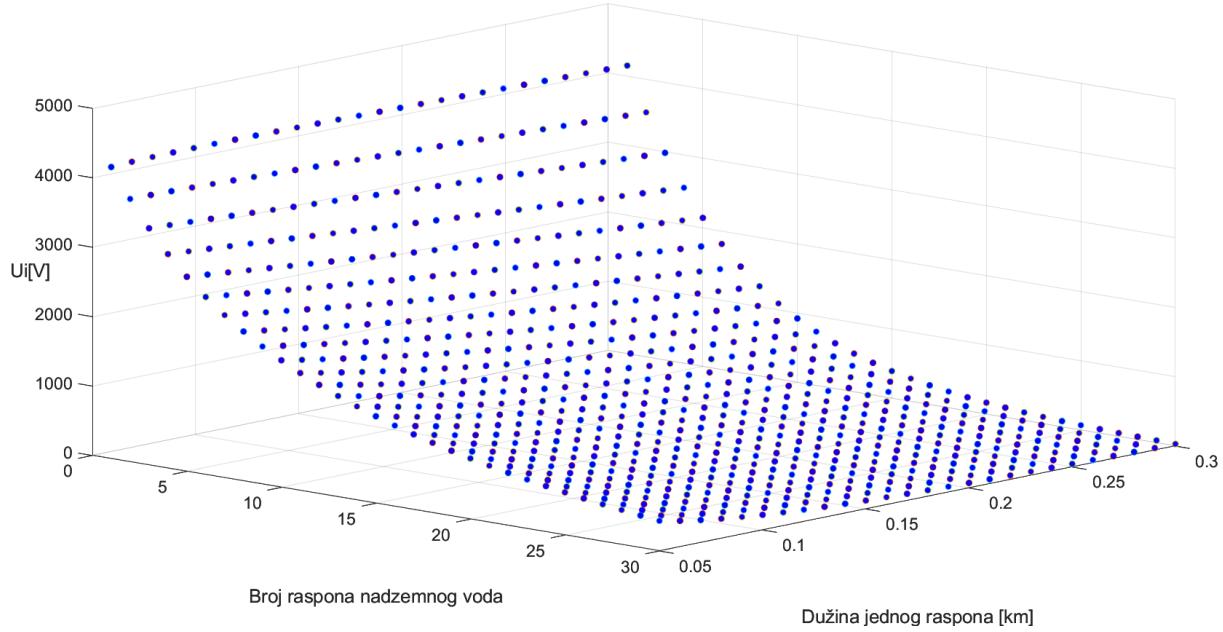


Slika 19. Efektivna vrijednost redukcionog faktora KV-a u zavisnosti od broja žila i prisustva armature

### 6.3 Analiza uticajnih faktora na iznesene napone nadzemnim vodovima

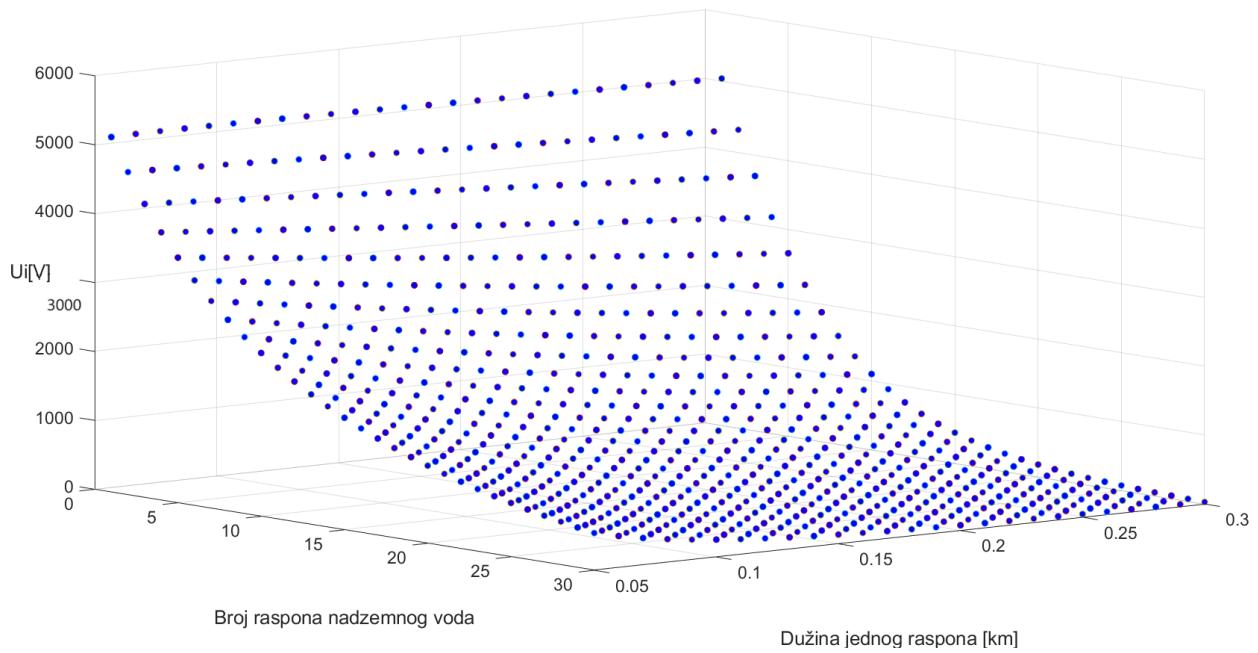
U cilju analize iznesenih napona NV-ovima u funkciji od različitih uticajnih parametara (slika 20 – slika 35), posmatra se slučaj kvara ka zemlji u VNRP-u. Mjesto kvara se napaja jednim NV-om (čije su nulte komponente struje kvara navedene uz specifikacije zasebnih NV-ova). Parametri, čiji je uticaj razmatran, su: broj raspona NV-a, dužina jednog raspona, ukupna dužina NV-a, naponski nivo, materijal provodnog dijela zaštitnog užeta, prosječna ambijentalna temperatura, efektivna vrijednost impedanse susjednog postrojenja, rezistansa VNRP-a pogođenog kvarom, specifični električni otpor tla i efektivna vrijednost nulte komponente struje kvara. Uticaj navedenih faktora, na iznesene napone, je analiziran pojedinačno i/ili kombinovano sa nekim drugim faktorom.

Na slici 20 se uočava da napon, iznesen iz postrojenja zaštitnim užetom, opada sa povećanjem dužine jednog raspona (ta zavisnost je uočljiva za veći broj raspona). Ukoliko su dužine raspona međusobno različite, što u praksi jeste slučaj, u proračunu se određuje jedna vrijednost - koja je dobijena kao aritmetička sredina dužina svih raspona. Sa grafika se uočava da izneseni napon eksponencijalno opada sa povećanjem broja raspona, i to intenzivnije za duže raspone. Za proračun efektivne vrijednosti iznesenog napona korišćen je sledeći NV: 35 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogođene kvarom je  $2 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $150 + j * 1500 \text{ A}$ .



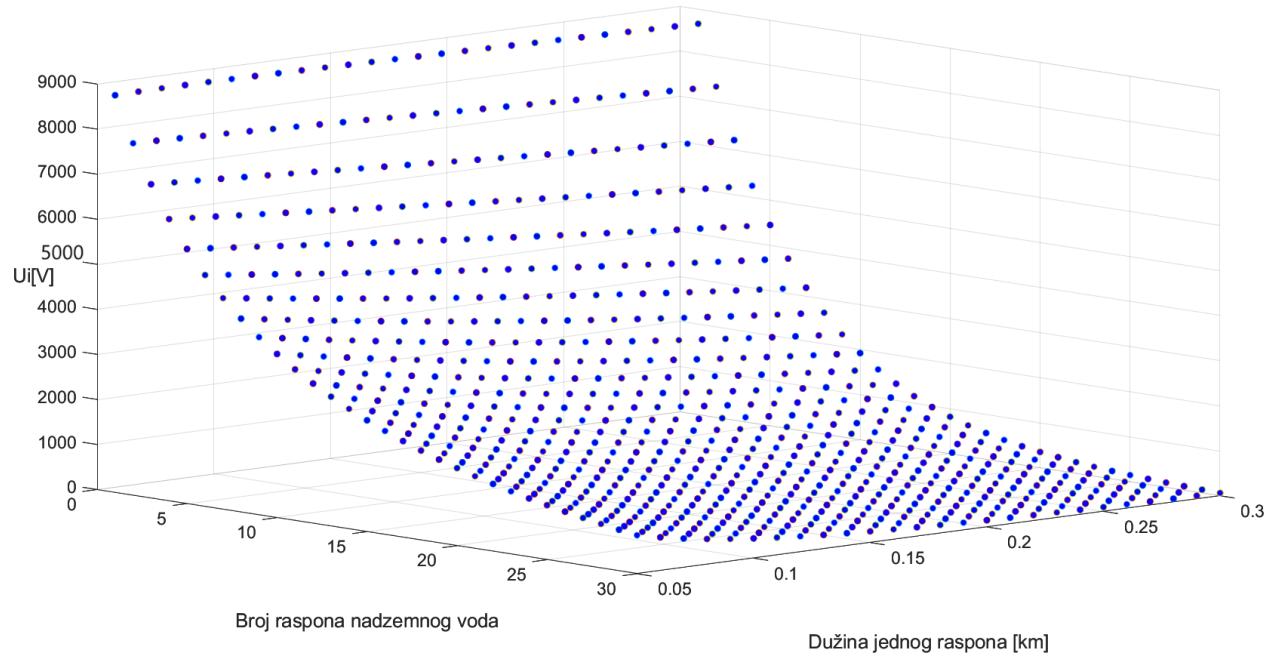
Slika 20. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od broja raspona NV-a i njihove dužine (35 kV)

Na slici 21 se uočavaju slične pravilnosti u ponašanju iznesenog napona, s tim što su pomenuti naponi znatno viši (s obzirom na to da je riječ o 110 kV NV-u). Zbog većeg broja zaštitnih užadi, ili njihovih većih poprečnih presjeka, kao i zbog drugačijih dimenzija uzemljivača, struje kvara i sl. dobijaju se i veći izneseni naponi. Za proračun je iskorišćen sledeći NV: 110 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $7 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodene kvarom je  $1 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $330 + j * 3300 \text{ A}$ .



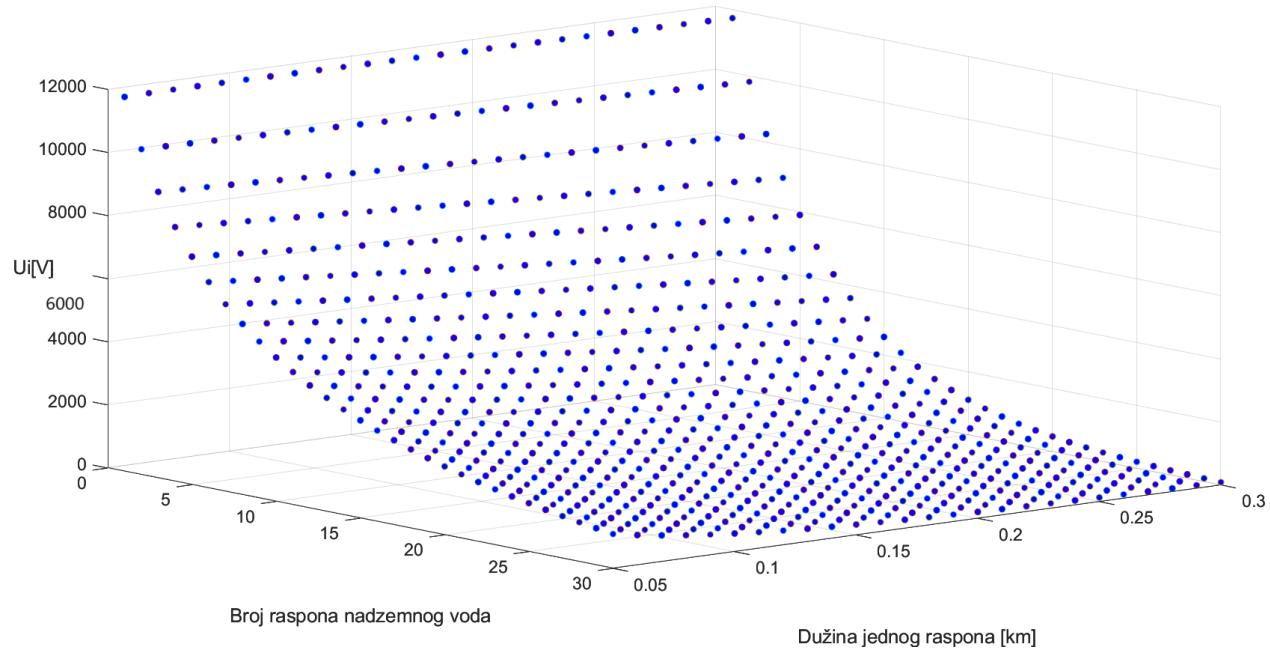
Slika 21. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od broja raspona NV-a i njihove dužine (110 kV)

Na slici 22 je prikazan izneseni napon 220 kV NV-a, po principu analognom slučajevima sa slikom 20 i 21. Izneseni naponi su znatno viši u odnosu na napone iznesene zaštitnim užadima 110 kV i 35 kV voda. Za proračun je korišćen NV sledećih karakteristika: 220 kV, dva aluminijumska zaštitna užeta, površina provodnog dijela presjeka jednog užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $5 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $1 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $660 + j * 6600 \text{ A}$ .



Slika 22. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od broja raspona NV-a i njihove dužine (220 kV)

Na slici 23 je prikazan izneseni napon 400 kV NV-a, po principu analognom slučajevima sa slike 20, 21 i 22. U ovom slučaju izneseni naponi su znatno viši u odnosu na napone iznesene zaštitnim užadima 220 kV, 110 kV i 35 kV voda. Za proračun je korišćen NV sledećih karakteristika: 400 kV, dva aluminijumska zaštitna užeta, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $4 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $1 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $990 + j * 9900 \text{ A}$ .



Slika 23. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od broja raspona NV-a i od dužine raspona (400 kV)

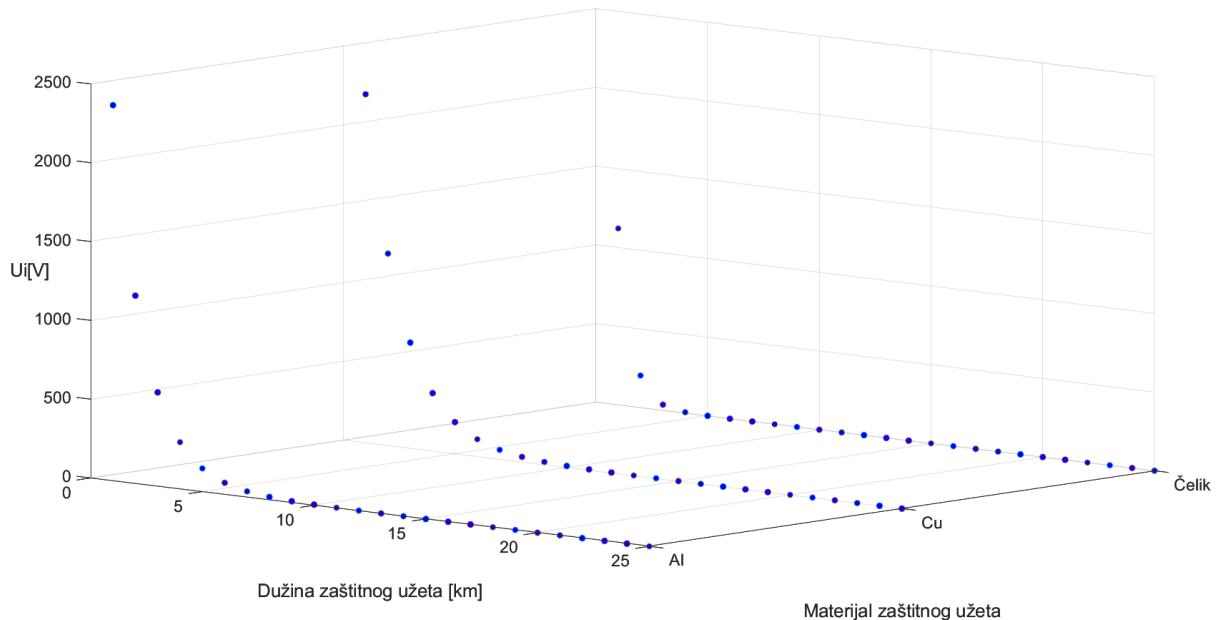
Slikom 24 je prikazana zavisnost iznesenog napona od dužine zaštitnog užeta i materijala njegovog provodnog dijela (odnosno slikom 25 za dužine NV-a do 2.5 km). Između aluminijuma, bakra i čelika, najprovodniji je bakar, zatim aluminijum i na kraju čelik. Za očekivati je da bakar (zbog najveće provodnosti) iznosi najveće potencijale. To je slučaj za dužine veće od 1.8 km (za fiksni raspon dužine od 0.2 km), međutim, za dužine između 0.2 km i 1.8 km najveće napone iznosi aluminijum, a do dužine 0.2 km najveće vrijednosti iznesenog napona imaju se u slučaju čelika. Ova pojava dešava se zbog nemonotone zavisnosti koeficijenta iznesenog potencijala i redukcionog faktora od materijala provodnog dijela zaštitnog užeta. Napon na koji dolazi uzemljivač postrojenja pogodenog kvarom takođe varira u značajnoj mjeri, što se može uočiti u poslednjoj koloni tabele 3. U tabeli 3 se mogu propratiti vrijednosti i ostalih veličina od kojih zavisi izneseni napon. Zelenom bojom označen je materijal zaštitnog užeta za koji se dobija najveća vrijednost iznesenog napona, zavisno od dužine NV-a.

Tabela 3. Koeficijent iznesenog potencijala, redukcioni faktor, impedansa zaštitnog užeta i povratnog puta i napon uzemljivača TS-e pogodene kvarom

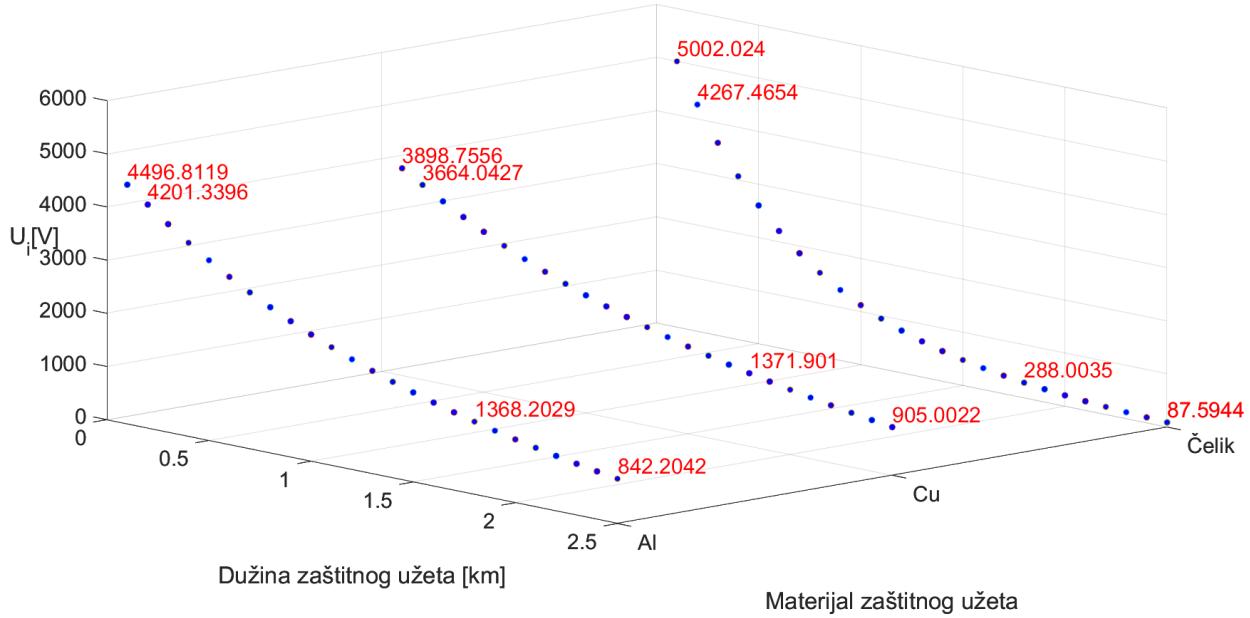
|                      |       | $k_i$  | $r_i$  | $Z_v[\Omega]$ | $U_{uz}[V]$ |
|----------------------|-------|--------|--------|---------------|-------------|
| $d = 0.1 \text{ km}$ | Al    | 0.9805 | 0.8234 | 3.2052        | 4586.295    |
|                      | Cu    | 0.9874 | 0.7104 | 3.1882        | 3948.37     |
|                      | Čelik | 0.8782 | 0.9919 | 3.4777        | 5696.0596   |
| $d = 0.2 \text{ km}$ | Al    | 0.9575 | 0.8297 | 2.8147        | 4387.8061   |
|                      | Cu    | 0.9723 | 0.7159 | 2.7839        | 3768.5061   |
|                      | Čelik | 0.7630 | 0.9936 | 3.2957        | 5593.2018   |
| $d = 0.3 \text{ km}$ | Al    | 0.9314 | 0.8318 | 2.5238        | 4198.6065   |
|                      | Cu    | 0.9546 | 0.7178 | 2.4809        | 3595.3132   |

|            |       |        |        |        |           |
|------------|-------|--------|--------|--------|-----------|
|            | Čelik | 0.6576 | 0.9942 | 3.1720 | 5515.3781 |
| d = 1.7 km | Al    | 0.4580 | 0.8353 | 1.4485 | 3201.6258 |
|            | Cu    | 0.5547 | 0.7208 | 1.3198 | 2624.527  |
|            | Čelik | 0.0641 | 0.9951 | 2.8915 | 5322.4234 |
| d = 1.8 km | Al    | 0.4291 | 0.8354 | 1.4367 | 3188.6296 |
|            | Cu    | 0.5253 | 0.7208 | 1.3063 | 2611.4649 |
|            | Čelik | 0.0541 | 0.9951 | 2.8909 | 5322.0423 |
| d = 1.9 km | Al    | 0.4017 | 0.8354 | 1.4271 | 3178.4302 |
|            | Cu    | 0.4970 | 0.7209 | 1.2955 | 2601.5223 |
|            | Čelik | 0.0457 | 0.9951 | 2.8905 | 5321.7866 |

Prilikom proračuna, čiji su rezultati prikazani slikama 24 i 25 i tabelom 3, korišćen je NV sledećih karakteristika: 35 kV, površina provodnog dijela presjeka zaštitnog užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $2 \Omega$ , dužina raspona je konstantna i iznosi  $200 \text{ m}$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $150 + j * 1500 \text{ A}$ .

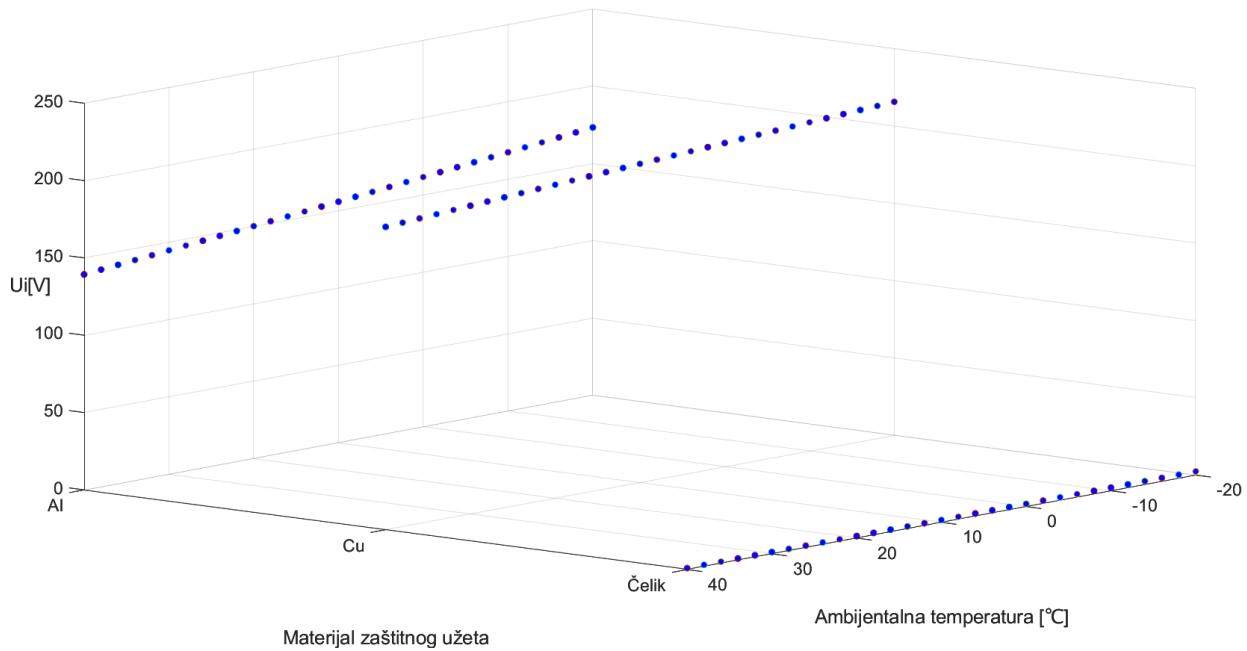


Slika 24. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od materijala provodnog dijela zaštitnog užeta i ukupne dužine NV-a



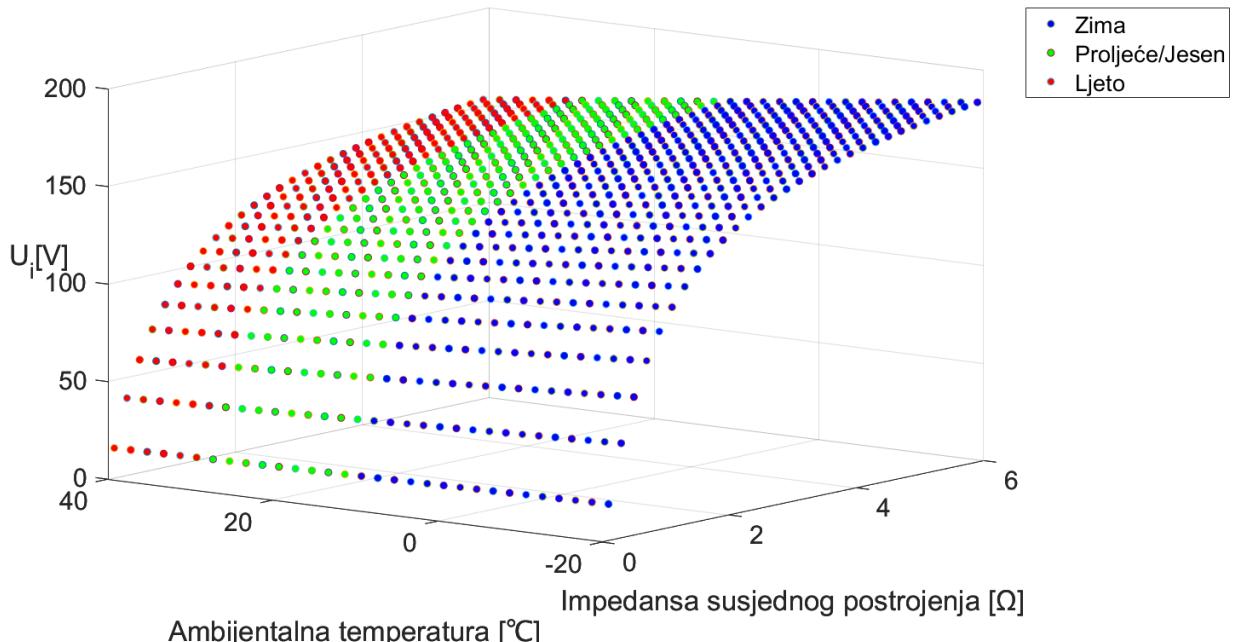
Slika 25. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od materijala provodnog dijela zaštitnog užeta i ukupne dužine NV-a (do dužine 2.5 km)

Na slici 26 se uočava da je izneseni napon, za fiksnu dužinu i broj raspona, najveći u slučaju bakra i ubjedljivo najniži u slučaju čelika (od 1.0119 V, za + 40 °C, do 2.4157 V, za temperaturu od – 20 °C). Ovaj rezultat proizilazi iz činjenice da je provodnost materijala najveća za bakar, zatim slijedi aluminijum i na kraju čelik. Ambijentalna temperatura izaziva izduživanje provodnika, povećanje njihovih ugiba, a samim tim i porast rezistanse faznih provodnika. Iz tog razloga, povećanje ambijentalne temperature direktno utiče na smanjenje iznesenih napona, što se uočava na slici 26. Prilikom ovog proračuna korišćen je NV sledećih karakteristika: 35 kV, površina provodnog dijela presjeka zaštitnog užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $2 \Omega$ , dužina raspona je konstantna i iznosi 200 m, ukupna dužina naadzemnog voda je 5 km, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $150 + j * 1500 \text{ A}$ .



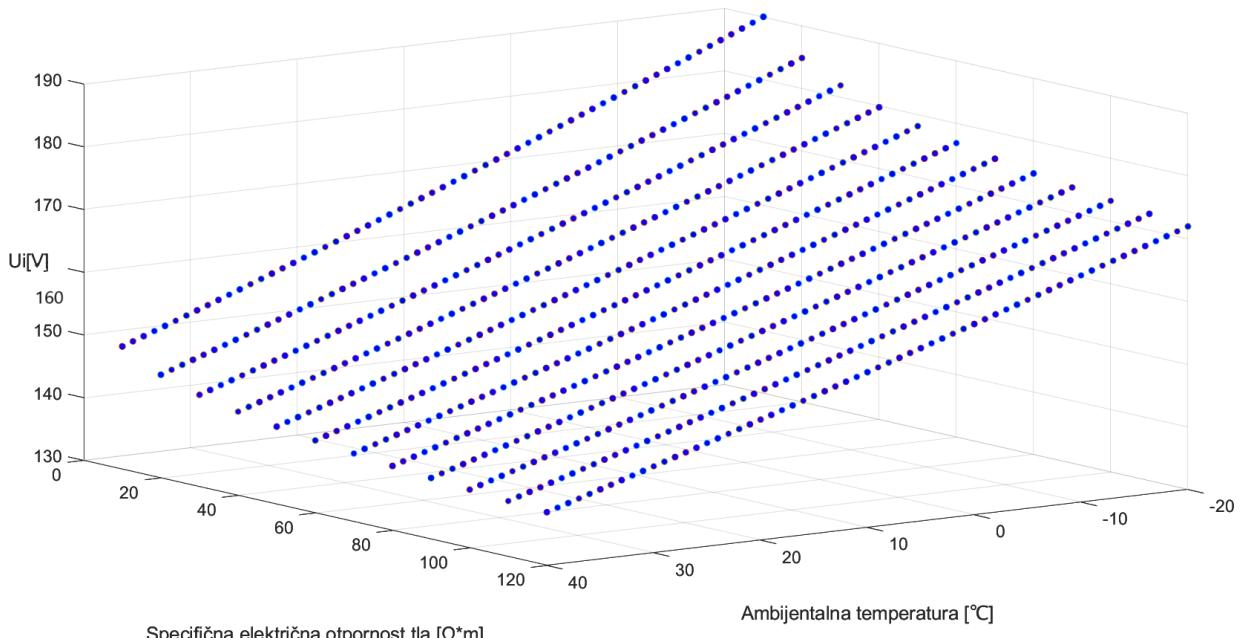
Slika 26. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od materijala provodnog dijela zaštitnog užeta i prosječne ambijentalne temperature

Na slici 27 se može pratiti izneseni napon po godišnjim dobima, u zavisnosti od impedanse susjednog postrojenja. Izneseni napon opada sa porastom ambijentalne temperature, kao što je zaključeno u opisu slike 26. S druge strane, izneseni napon raste sa porastom impedanse susjednog postrojenja. On predstavlja razliku potencijala koja se javlja na uzemljivaču susjednog postrojenja i sa porastom impedanse tog postrojenja raste i napon na istom. Takođe, povećanje ove impedanse izaziva i smanjenje iznesene struje, koje ima manji uticaj na izneseni napon, negoli povećanje impedanse susjednog postrojenja. Matematički gledano, razlog je što je susjedna trafostanica još jedna paralelno dodata impedansa u nizu četvoropola. Za proračun je korišćen NV sledećih karakteristika: 110 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , otpornost stubova je  $7 \Omega$ , dužina jednog raspona je konstantna i znosi  $200 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $1 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $330 + j * 330 \text{ A}$ .



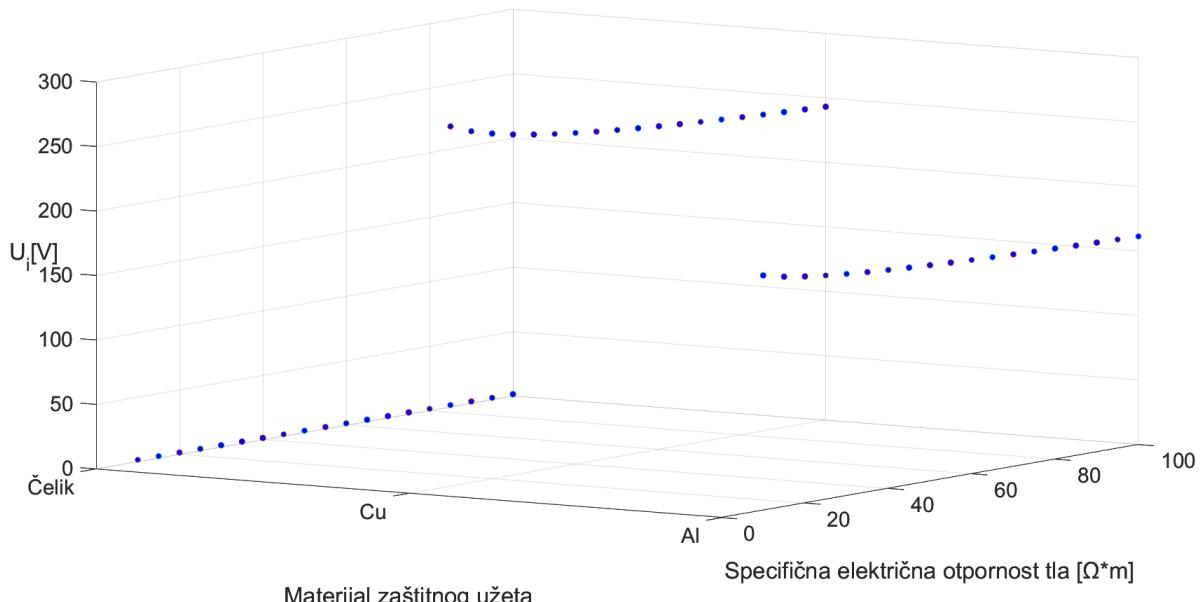
Slika 27. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od godišnjeg doba i efektivne vrijednosti impedanse susjednog postrojenja

Analizom slike 28 se uočava da izneseni napon opada, gotovo linearno, sa povećanjem specifičnog električnog otpora tla. Povećanjem ovog uticajnog faktora se povećava otpor povratnog puta iznesene struje kvara, odnosno iznesenog napona. Sa prethodnih grafika, kao i sa ovog, uočljivo je da izneseni napon linearno opada sa povećanjem ambijentalne temperature. Promjena ambijentalne temperature blago utiče na intezitet i prirodu promjene uticaja specifičnog električnog otpora tla na iznesene napone. Za proračun je korišćen NV: 35 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , dužina jednog raspona je konstantna i iznosi  $200 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $2 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $150 + j * 1500 \text{ A}$ .



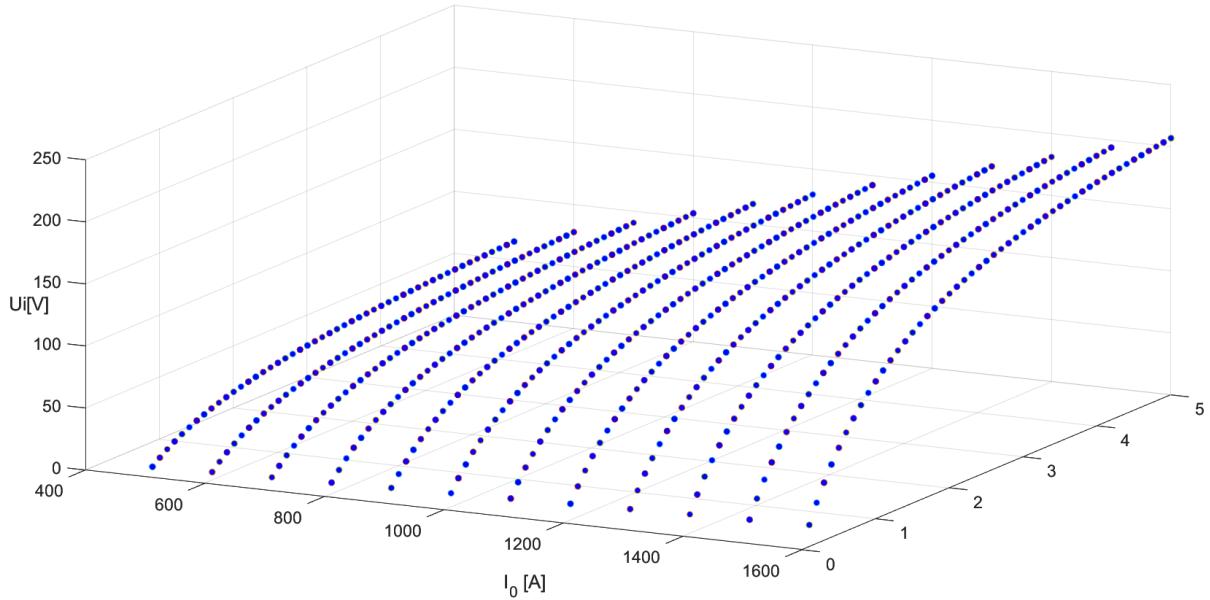
Slika 28. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od specifičnog električnog otpora tla i prosječne ambijentalne temperature

Na slici 29 se uočava da izneseni napon opada sa povećanjem specifičnog električnog otpora tla, pri čemu raspon između maksimalnog i minimalnog iznesenog napona (za sve druge fiksne parametre, osim za specifičnu električnu otpornost tla) nije veći od oko 20% njegove maksimalne vrijednosti. Za bakar, kao najprovodniji među elementima sa apcise, izneseni napon je maksimalan. Zatim slijedi aluminijum, dok se ubjedljivo najmanji izneseni napon dobija za čelik. Za proračun je korišćen NV: 110 kV, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $7 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , dužina jednog raspona je konstantna i iznosi  $200 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $1 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $330 + j * 3300 \text{ A}$ .



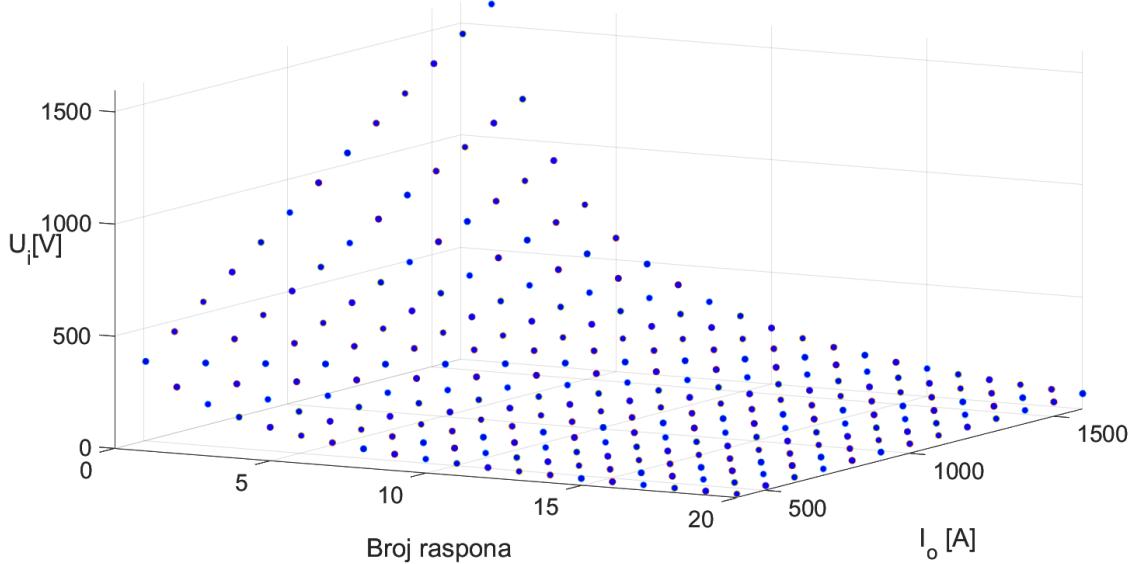
Slika 29. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od specifične električne otpornosti tla i materijala zaštitnog užeta

Na slici 30 se primjećuje da izneseni napon raste sa porastom rezistanse uzemljenja TS-e pogodjene kvarom, i to kvadratno do vrijednosti od oko  $2 \Omega$ . Povećanjem impedanse TS-e, u kojoj se javlja kvar, se dominantno utiče na povećanje napona uzemljivača pomenutog postrojenja – što direktno povećava i iznesene napone. Takođe, vrijednost iznesenih napona linearno raste sa porastom nulte komponente struje kvara. Za proračun je korišćen NV: 35 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , dužina jednog raspona je konstantna i iznosi  $200 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ .



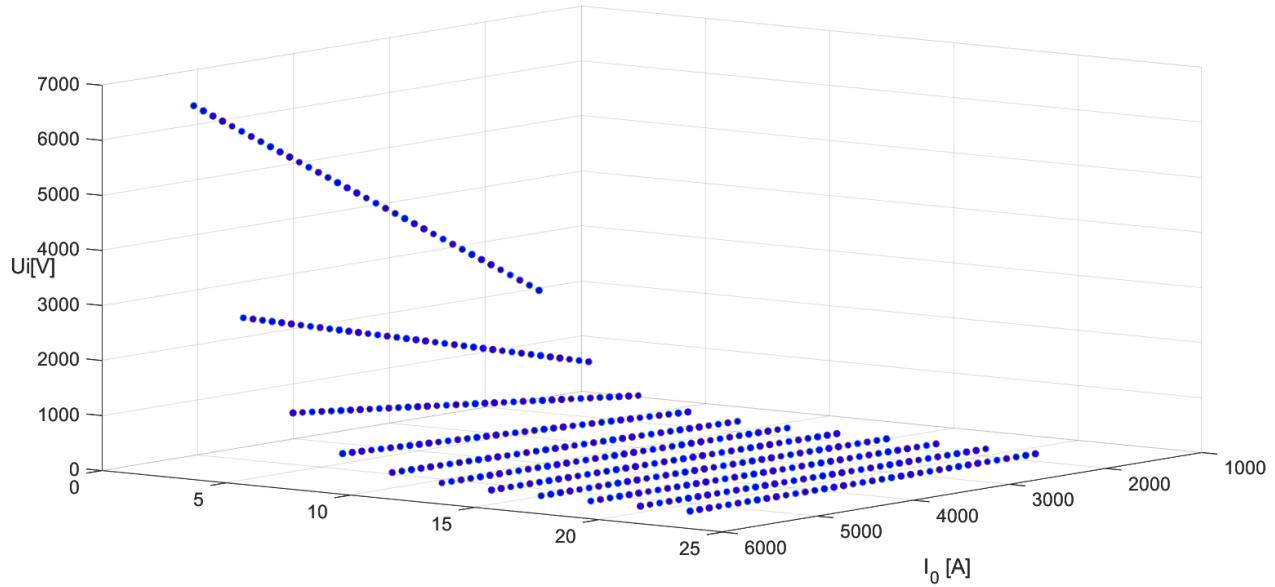
Slika 30. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara i rezistanse uzemljivača TS-e pogodjene kvarom

Sa slike 31 se zaključuje da izneseni napon drastično raste sa povećanjem nulte komponente struje kvara, u slučaju kraćih vodova. Sa porastom broja raspona NV-a, izneseni napon opada. To je očekivano, s obzirom na to da se povećava broj odvodnih puteva (rezistanse uzemljenja stubova), kao i vrijednost ekvivalentne redne impedanse. Takođe, sa porastom broja raspona voda, izneseni napon robusnije raste sa porastom nulte komponente struje kvara. Za proračun je korišćen NV: 35 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , rezistansa TS-e pogodjene kvarom je  $2 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $10 \text{ km}$ .



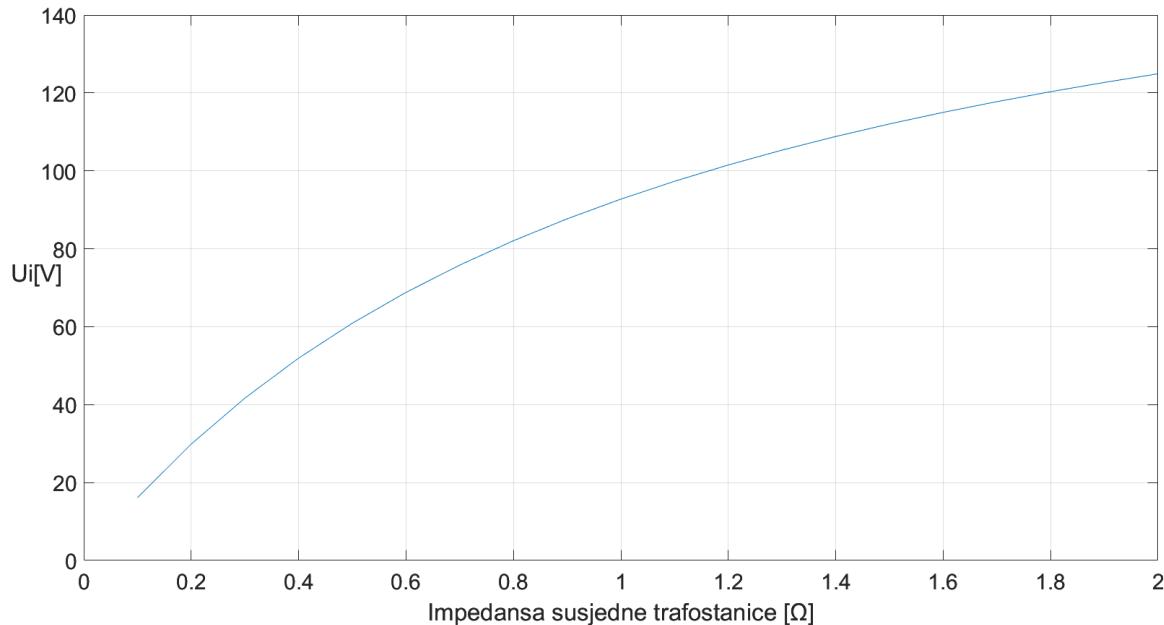
Slika 31. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara i broja raspona

Sa slike 32 se zaključuje da izneseni napon drastično raste sa povećanjem nulte komponente struje kvara, u slučaju kraćih vodova. Zaključak je da, sa porastom dužine voda, izneseni napon robusnije raste sa porastom nulte komponente struje kvara. Za proračun je korišćen NV: 110 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , specifična električna otpornost zemljišta  $100 \Omega * \text{m}$ , otpornost stubova je  $7 \Omega$ , dužina jednog raspona je konstantna i iznosi  $500 \text{ m}$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $6 \Omega$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $1 \Omega$ .



Slika 32. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od ukupne dužine NV i efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara

Na slici 33 se može propratiti ponašanje iznesenog napona koji se, kvadratnom zavisnošću, povećava sa porastom efektivne vrijednosti impedanse susjedne TS-e. Detaljnije objašnjenje razloga zašto se ovo dešava, dato je u opisu slike 27. Za proračun je korišćen NV sledećih karakteristika: 110 kV, aluminijumska zaštitna uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , specifična električna otpornost zemljišta  $100 \Omega * \text{m}$ , otpornost stubova je  $7 \Omega$ , dužina jednog raspona je konstantna i iznosi  $200 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom je  $1 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $330 + j * 3300 \text{ A}$ .

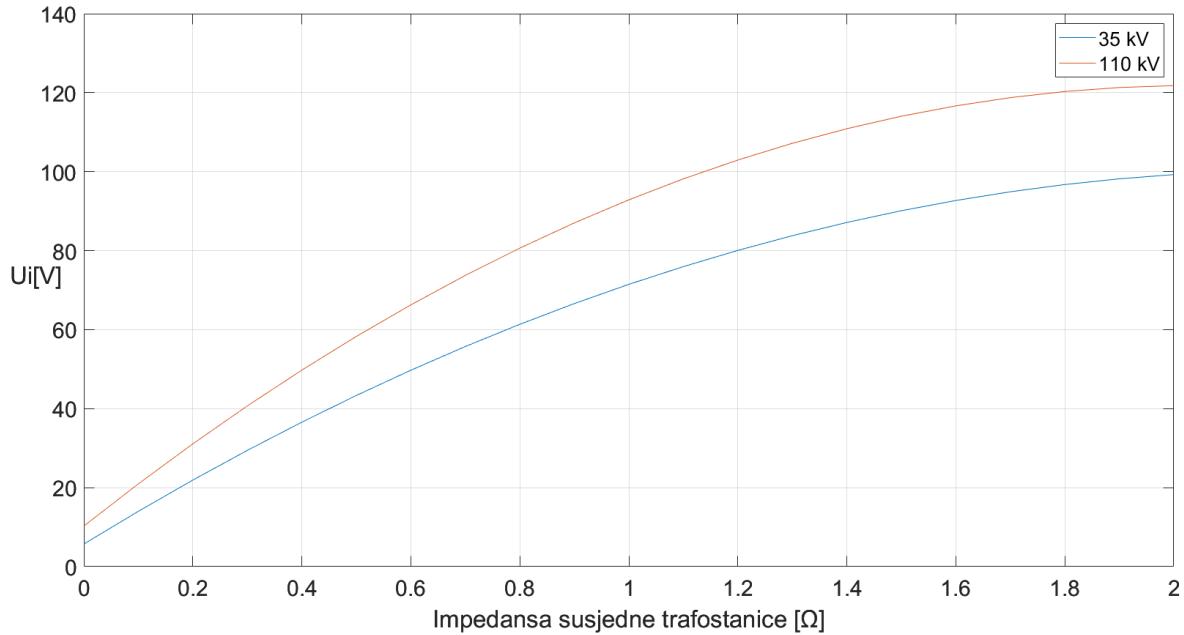


Slika 33. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od efektivne vrijednosti impedanse susjedne TS-e

Ova zavisnost, za navedeni 110 kV NV, se može ekstrapolirati sledećom funkcijom:

$$U_i = -26.8433 * Z_2^2 + 109.4402 * Z_2 + 10.2767 \quad (157)$$

Na slici 34, analogno slici 33, prikazan je porast iznesenog napona, koji se događa sa porastom efektivne vrijednosti impedanse susjedne TS-e. Razlika je što se na slici 34 može istovremeno propratiti pomenuta zavisnost i za 35 kV i za 110 kV NV. Očekivano, izneseni naponi su viši za slučaj 110 kV NV-a zbog, između ostalog, većih struja kvarova. Za proračun su korišćeni sledeći NV-ovi: 35 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.004 \text{ m}$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * \text{m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , rezistansa TS-e pogodene kvarom je  $2 \Omega$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $10 \text{ km}$ , dužina jednog raspona je konstantna i  $200 \text{ m}$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $150 + j * 1500 \text{ A}$ ; 110 kV, aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , specifična električna otpornost zemljišta  $100 \Omega * \text{m}$ , otpornost stubova je  $7 \Omega$ , dužina jednog raspona je konstantna i iznosi  $200 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , rezistansa uzemljenja TS-e pogodene kvarom je  $1 \Omega$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $330 + j * 3300 \text{ A}$ .

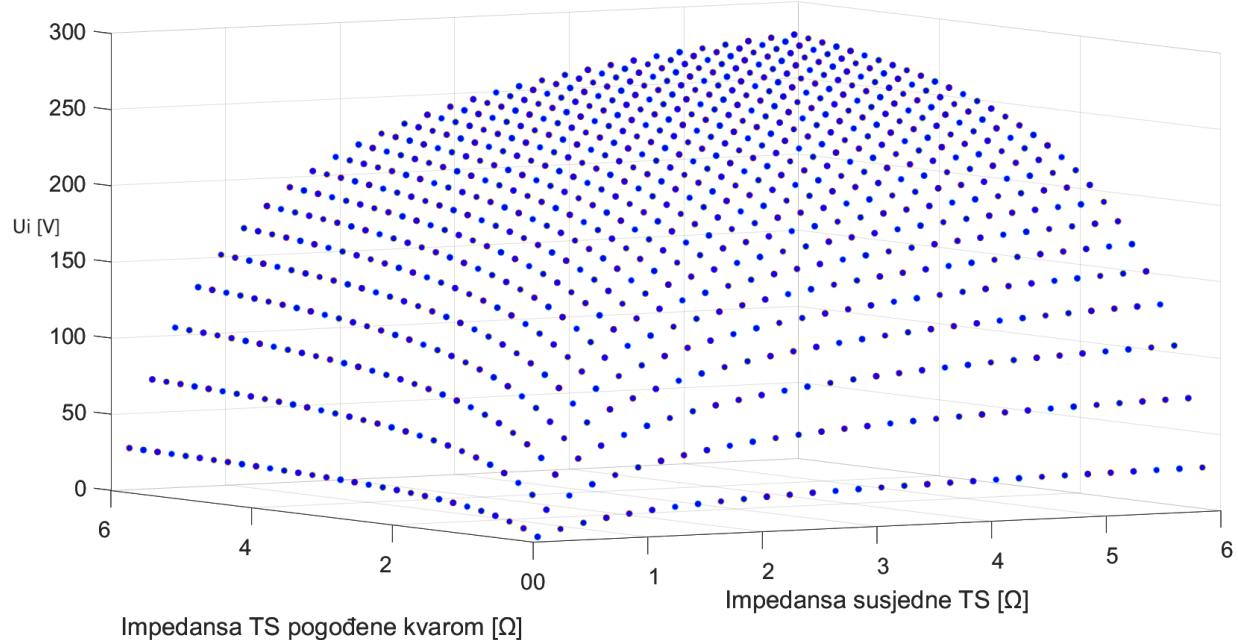


Slika 34. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od impedanse susjedne TS-e za 35 kV i 110 kV NV-e

Zavisnost, za navedeni 35 kV NV, se može ekstrapolirati sledećom funkcijom:

$$U_i = -18.9757 * Z_2^2 + 84.7204 * Z_2 + 5.7259 \quad (158)$$

Na slici 35 se uočava da izneseni napon raste sa povećanjem efektivne vrijednosti impedanse susjedne TS-e i povećanjem rezistanse TS-e pogodjene kvarom. Izneseni napon zavisi linearno od efektivne vrijednosti impedanse susjedne TS-e, kada je vrijednost rezistanse TS-e pogodjene kvarom niska – odnosno kvadratno, kada je njena vrijednost vrlo visoka. Isti zaključak važi i za zavisnost iznesenog napona od rezistanse TS-e pogodjene kvarom. Za proračun je korišćen NV sledećih karakteristika: 110 kV, aluminijumska zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , spoljni poluprečnik užeta je  $r_u = 0.006 \text{ m}$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , specifična električna otpornost zemljišta  $100 \Omega * \text{m}$ , otpornost stubova je  $7 \Omega$ , dužina jednog raspona je konstantna i iznosi  $200 \text{ m}$ , ukupna dužina NV-a je  $5 \text{ km}$ , poluprečnik provodnika ekvivalentnog zaštitnom užetu sa povratnim putem je  $r_j = 0.05 \text{ m}$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $330 + j * 3300 \text{ A}$ .



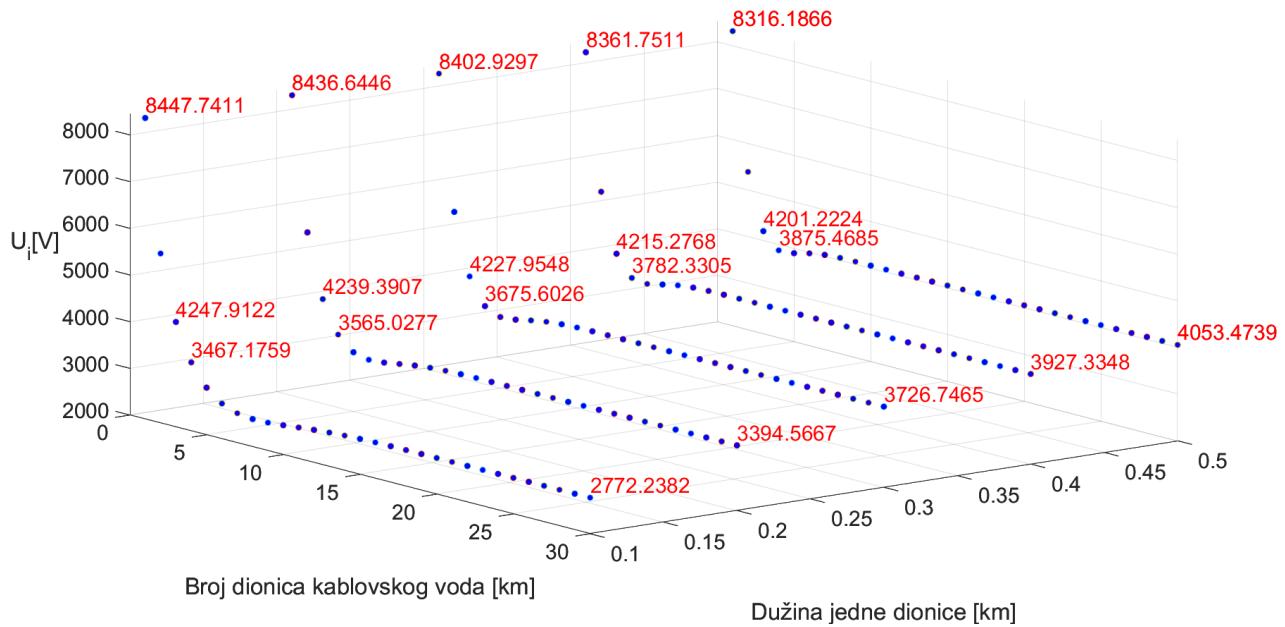
Slika 35. Efektivna vrijednost iznesenog napona u zavisnosti od efektivne vrijednosti impedansi postrojenja pogođenog kvarom i susjednog postrojenja

#### 6.4 Analiza uticajnih faktora na iznesene napone kablovskim vodovima

U cilju analize iznesenih napona KV-ovima u funkciji od različitih uticajnih parametara (slika 36 – slika 66), posmatra se slučaj kvara ka zemlji u VNRP-u. Mjesto kvara se napaja jednim KV-om (čije su nulte komponente struje kvara navedene uz specifikacije zasebnih KV-ova). Parametri, čiji je uticaj razmatran, su: broj dionica KV-a, dužina jedne dionice, ukupna dužina KV-a, broja žila (jedna ili tri), materijal metalnog plašta, redni broj TS-e do koje se iznosi napon, specifična električna otpornost tla, efektivne vrijednost nulte komponente struje kvara, prisustvo armature, njen materijal, broj armaturnih traka, njihova debljina, širina, korak uvijanja trake, efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a i rezistansa TS-e pogođene kvarom. Uticaj navedenih faktora, na iznesene napone, je analiziran pojedinačno i/ili kombinovano sa nekim drugim faktorom.

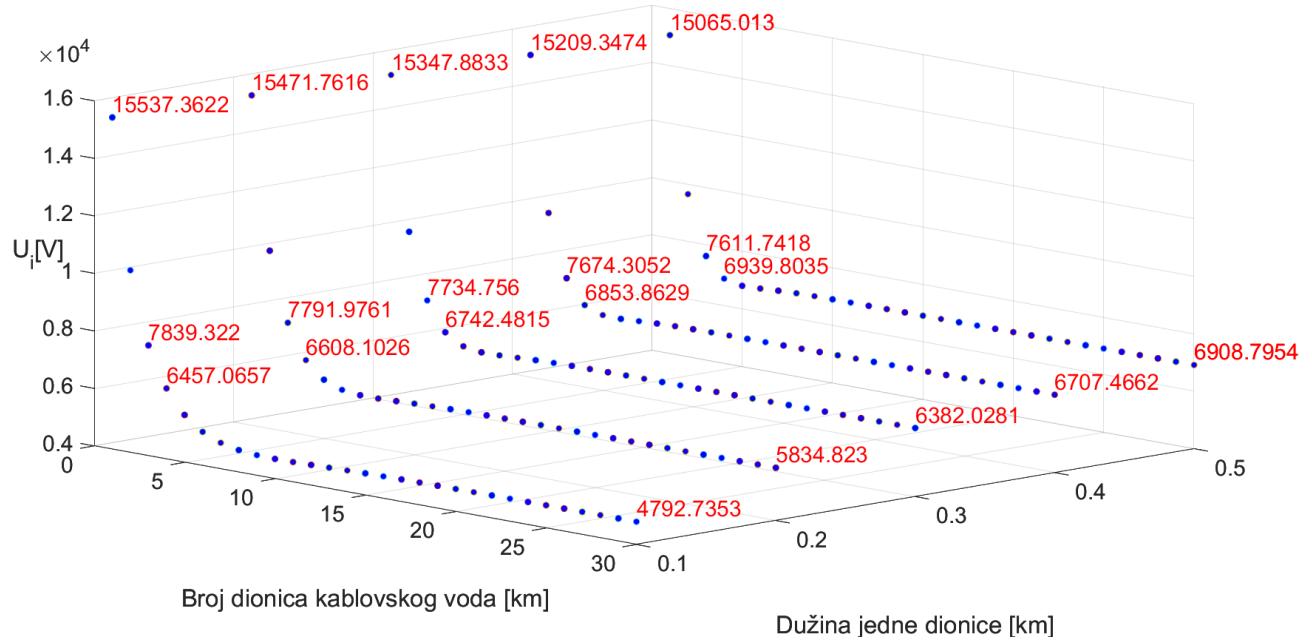
Na slici 36 se uočava da izneseni napon, prve susjedne TS-e, opada sa porastom broja dionica kabla, do njihovog određenog broja. Međutim, nakon određenog ukupnog broja dionica, izneseni naponi blago rastu (primjetnije za duže dionice). Interesantan je zaključak da napon uzemljivača (TS-e pogođene kvarom) naglo opada, do tog određenog ukupnog broja dionica. Nakon tog broja, napon uzemljivača blaže opada, dok izneseni naponi blago rastu. Za fiksni broj dionica, pri povećanju njihove dužine, izneseni naponi blago opadaju, do određenog ukupnog broja dionica. Međutim, nakon određenog ukupnog broja dionica, izneseni naponi rastu sa povećanjem njihove dužine (primjetnije za veći ukupan broj dionica). Interesantan je zaključak da napon uzemljivača blago raste, do tog određenog ukupnog broja dionica, a izneseni napon blago opada. Nakon tog broja, napon uzemljivača izrazitije raste, dok izneseni naponi blago rastu. Razlog ovakvih promjena jeste kombinacija uticaja redupcionog faktora kabla, njegovog koeficijenta iznesenog potencijala, impedanse i napona uzemljivača postrojenja pogođenog kvarom. Kada se povećava broj dionica kabla, izneseni naponi

(glezano za sve redno vezane TS-e) brže eksponencijalno opadaju (opisi slika 49 i 50). Izneseni napon prve susjedne TS-e je veći za veći broj dionica. Kada se povećava dužina tih dionica, eksponencijalno opadanje iznesenih napona je izraženije. Jedan od razloga je povećanje impedanse kabla, koje utiče na povećanje napona uzemljivača. Za proračun je korišten sledeći KV: jednožilni (jedna žila je jedna faza) - XHP 48/36-A 3x1x400/35 mm<sup>2</sup> 20.8/36/42 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 35 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je  $2 \Omega$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.0015 m$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $1000 - j * 10000 A$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $800 mm$ , korak uvijanja trake je  $30 mm$ , broj traka je 2, širina trake je  $12 mm$ , debljina jedne trake je  $1.5 mm$ .



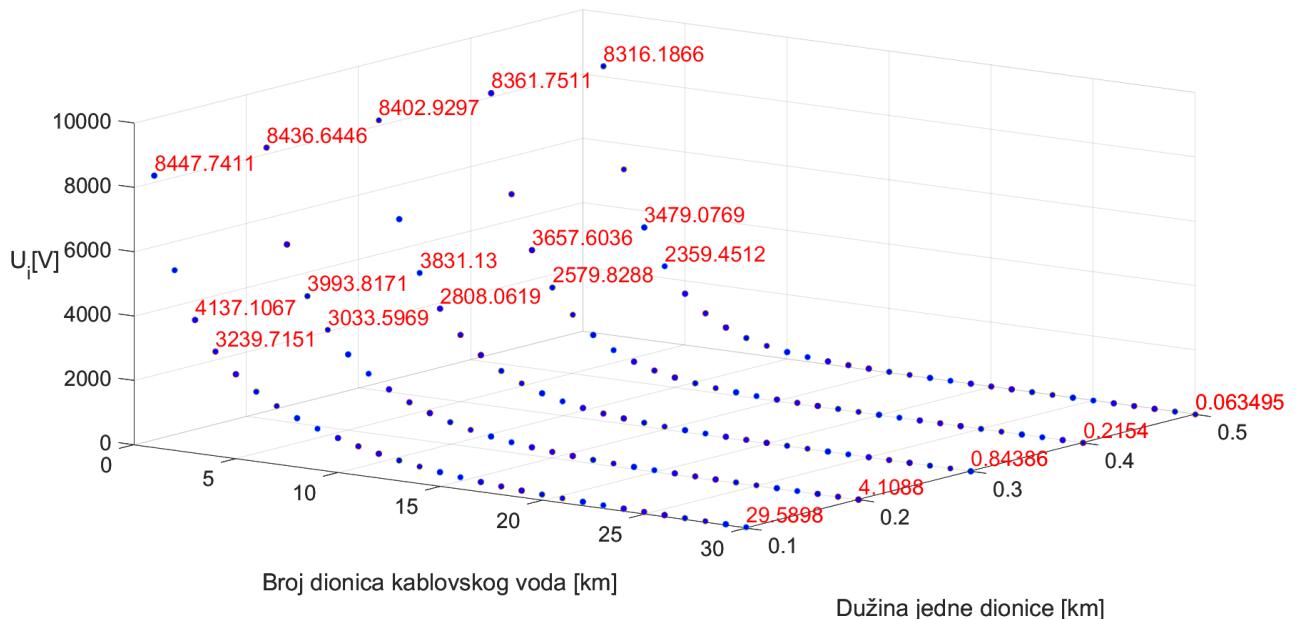
Slika 36. Efektivna vrijednost iznesenog napona prve susjedne TS-e u zavisnosti od dužine jedne dionice i ukupnog broja dionica jednožilnog 35 kV KV-a (sa armaturom)

Na slici 37 nalazi se prikaz iste zavisnosti kao na slici 36. Razlika je u tome što kabl, u ovom slučaju, nema armaturu. Uočljivo je da se izneseni naponi ponašaju isto (s tom razlikom da su njihove vrijednosti više, negoli kada je armatura prisutna). Uticaj armature na iznesene napone je objašnjen u opisu slika 47 i 48. Za proračun je korišten kabl iz opisa slike 36, sa tom razlikom što je izuzeta armatura.



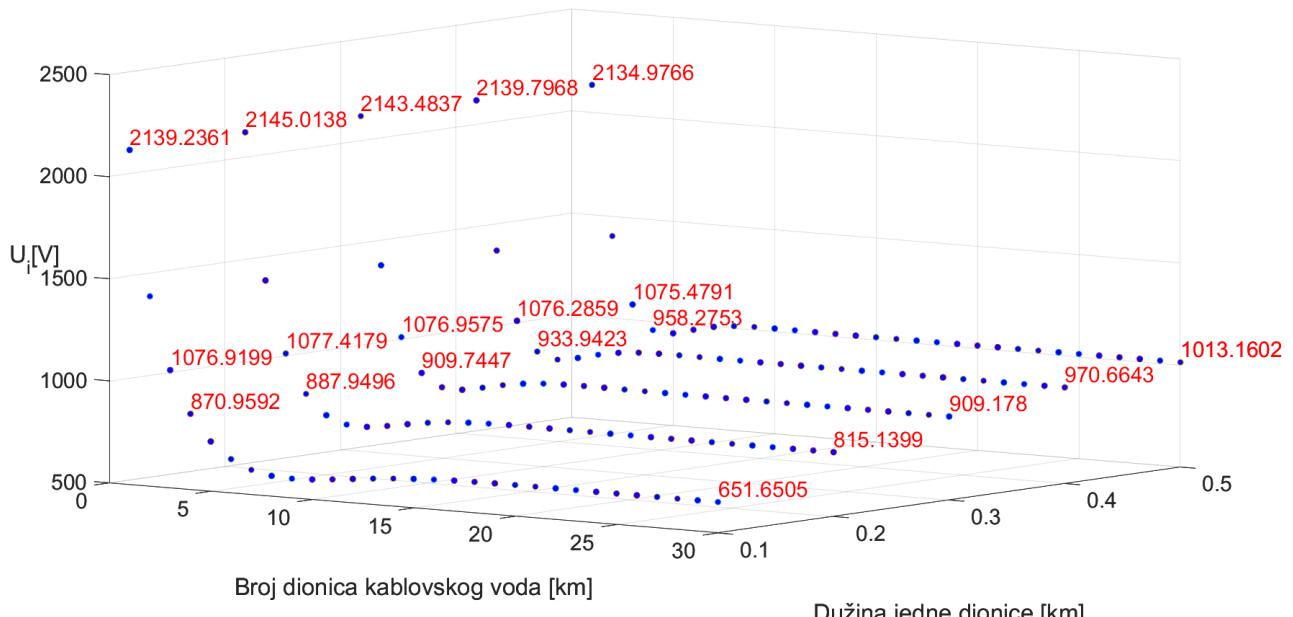
Slika 37. Efektivna vrijednost iznesenog napona prve susjedne TS-e u zavisnosti od dužine jedne dionice i ukupnog broja dionica jednožilnog 35 kV KV-a (bez armature)

Na slici 38 je, analogno slici 36, dat prikaz iznesenog napona, ali posljedne susjedne TS-e. Očekivano, izneseni napon posljedne susjedne TS-e je niži od iznesenog napona prve susjedne TS-e, zbog toga što je posljedna na najvećoj udaljenosti od mesta kvara. Kod posmatranja iznesenih naponi kod posljedne TS-e nema promjena trenda u njegovom ponašanju, kao za slučaj prve susjedne TS-e. Izneseni napon opada i sa povećanjem broja dionica (eksponencijalno) i sa povećanjem njihove dužine (blago linearno). Za proračun je korišćen identičan kabl iz opisa slike 36.



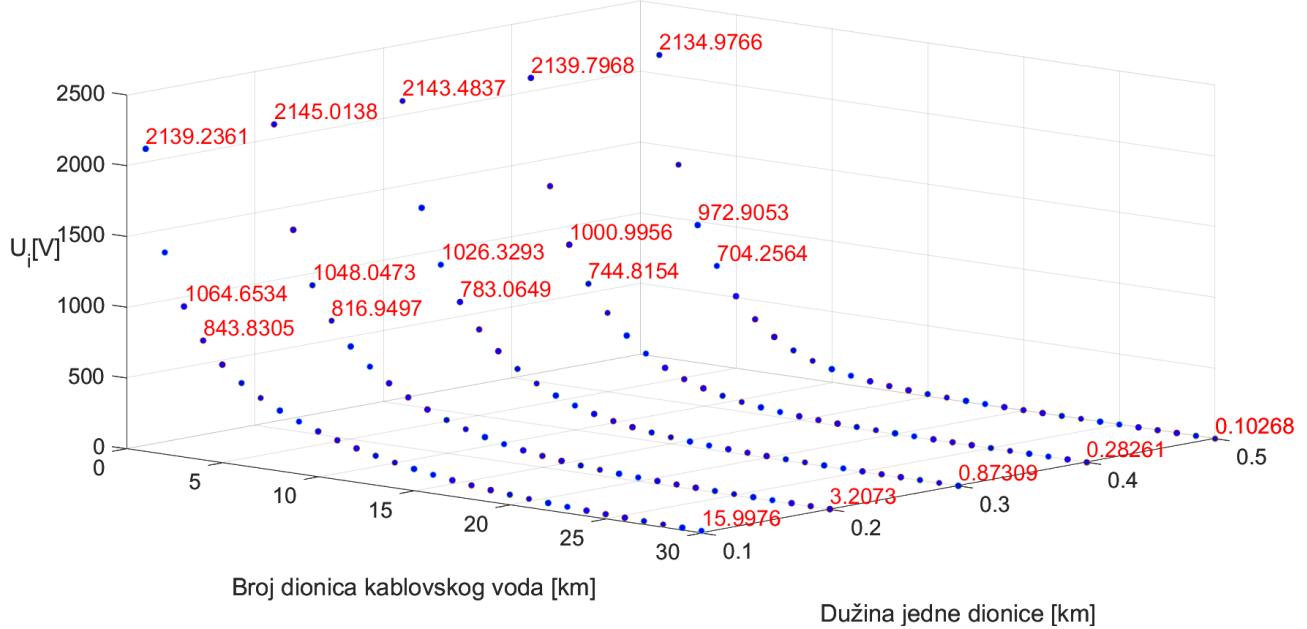
Slika 38. Efektivna vrijednost iznesenog napona posljedne susjedne TS-e u zavisnosti od dužine jedne dionice i ukupnog broja dionica jednožilnog 35 kV KV-a

Na slici 39 se uočava da izneseni napon podliježe istim zakonitostima kao i u slučaju slike 36, s tom razlikom da su u ovom proračunu izneseni naponi drastično niži. To je za očekivati, s obzirom na to da je sada proračun vršen za trožilni 10 kV KV, za koji su struje kvarova (dominantan faktor) znatno niže zbog nižeg naponskog nivoa. Za proračun je korišćen sledeći KV: trožilni - XHE 49/24 3x120/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra, specifična otpornost zemljišta je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je  $2 \Omega$ , poluprečnik provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $3 * 0.002 m$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 A$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 mm$ , korak uvijanja trake je  $30 mm$ , broj traka je 2, širina trake je  $9 mm$ , debljina jedne trake je  $1 mm$ .



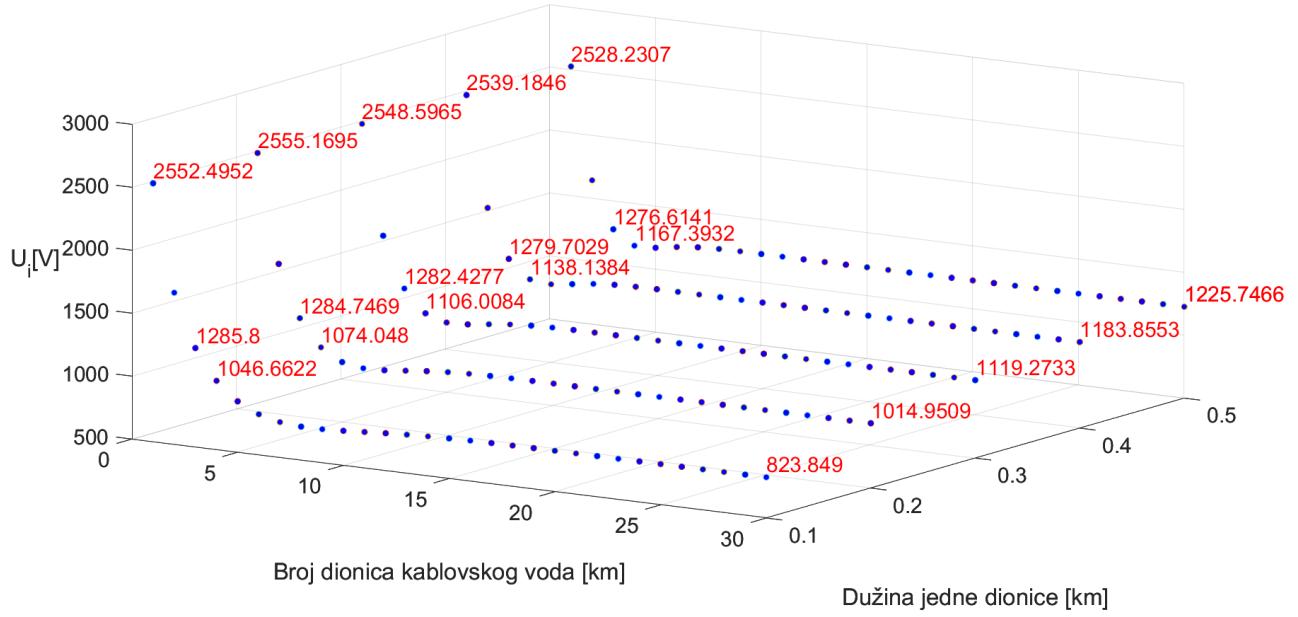
Slika 39. Efektivna vrijednost iznesenog napona prve susjedne TS-e u zavisnosti od dužine jedne dionice i ukupnog broja dionica trožilnog 10 kV KV-a

Na slici 40 je, analogno slići 38, dat prikaz iznesenog napona, ali za slučaj trožilnog 10 kV kabla. Kao što je već pokazano, izneseni napon posljedne susjedne TS-e je niži od iznesenog napona prve susjedne TS-e. Za proračun je korišćen identičan kabl iz opisa slike 39.



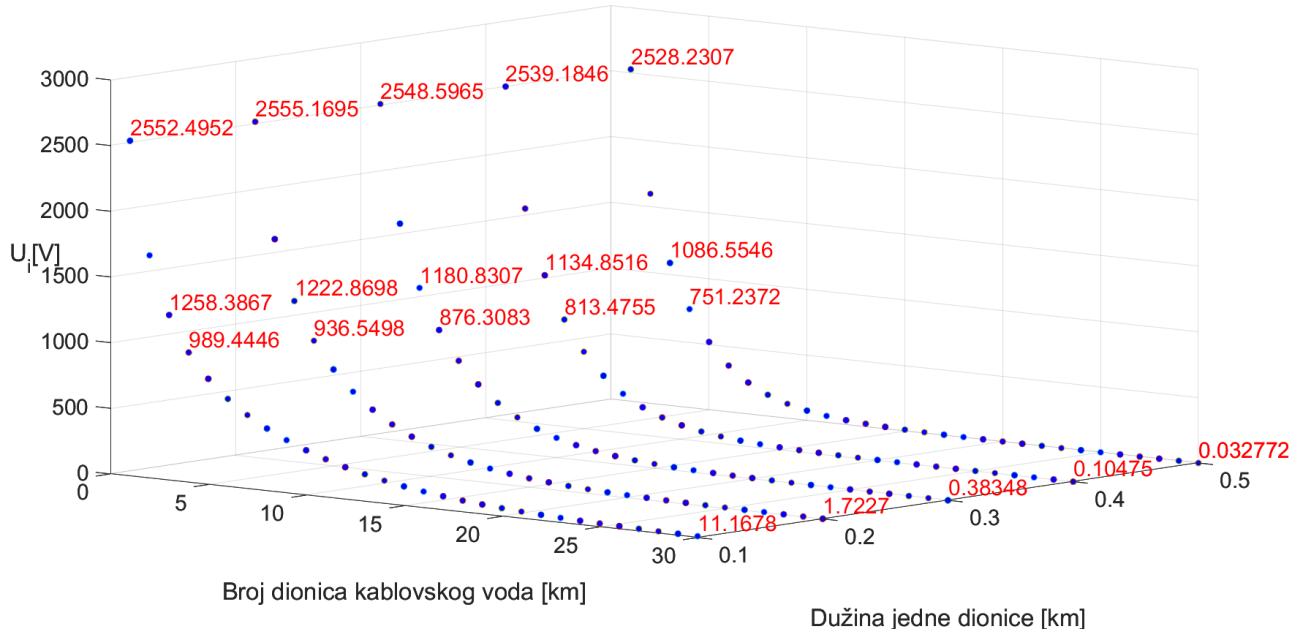
Slika 40. Efektivna vrijednost iznesenog napona poslednje susjedne TS-e u zavisnosti od dužine jedne dionice i ukupnog broja dionica trožilnog 10 kV KV-a

Na slici 41 se uočava da izneseni napon podliježe istim zakonitostima kao i u slučaju slike 39, s tom razlikom da se ovaj proračun odnosi na jednožilni 10 kV KV. U poređenju sa trožilnim kablom, izneseni naponi, kod prve TS-e, su sada viši. To se dešava iz razloga što jednožilni kabl ima manje materijala utrošenog za metalne zaštite. To uvećava impedansu odvodnog puta jednožilnog kabla, odnosno napon uzemljivača. Sa druge strane, trožilni kabl ima veći koeficijent iznesenog potencijala, što pospješuje uvećanje istih. Trožilni kabl ima manji redukcioni faktor, što smanjuje i napon uzemljivača TS-e pogodene kvarom. Zaključak je da dominantan uticaj na iznesene napone (u ovom slučaju) ima smanjen napon uzemljivača TS-e pogodene kvarom, u slučaju trožilnog kabla, u odnosu na jednožilni. Za proračun je korišćen KV sledećih karakteristika: jednožilni - XHP 48/O-A  $3 \times 1 \times 95/16 \text{ mm}^2$  6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $16 \text{ mm}^2$ , specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je  $2 \Omega$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.002 \text{ m}$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 \text{ mm}$ , korak uvijanja trake je  $30 \text{ mm}$ , broj traka je 2, širina trake je  $9 \text{ mm}$ , debljina jedne trake je  $1 \text{ mm}$ .



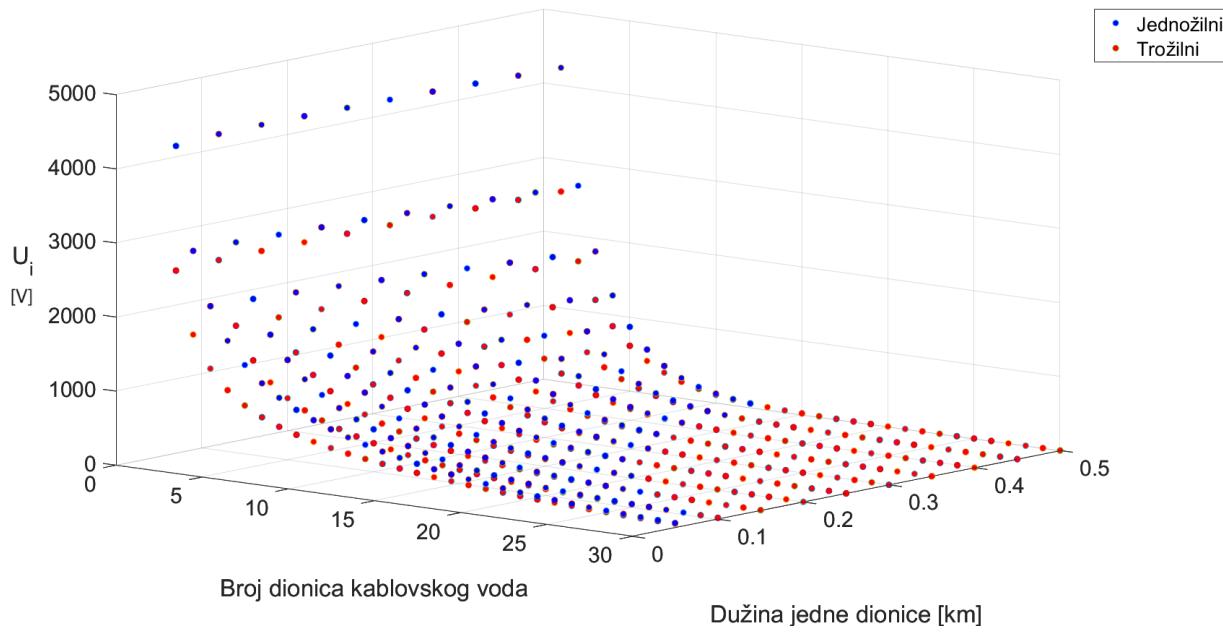
Slika 41. Efektivna vrijednost iznesenog napona prve susjedne TS-e u zavisnosti od dužine jedne dionice i ukupnog broja dionica jednožilnog 10 kV KV-a

Na slici 42 je, analogno slici 40, dat prikaz iznesenog napona, ali poslednje susjedne TS-e. Očekivano, izneseni napon poslednje susjedne TS-e je niži od iznesenog napona prve susjedne TS-e. Za proračun je korišćen identičan kabl iz opisa slike 41. Specifičnost koja se može uočiti, jeste da je za veliki broj dugih dionica izneseni napon trožilnog kabla viši, negoli u slučaju jednožilnog. Razlog je što strmiji pad koeficijenta iznesenog potencijala (do TS-a) duž jednožilnog kabla izaziva strmiji pad eksponencijalno raspodijeljenih iznesenih napona duž svih redno vezanih TS-a. Objašnjenje slijedi u opisu slika 43 i 44.



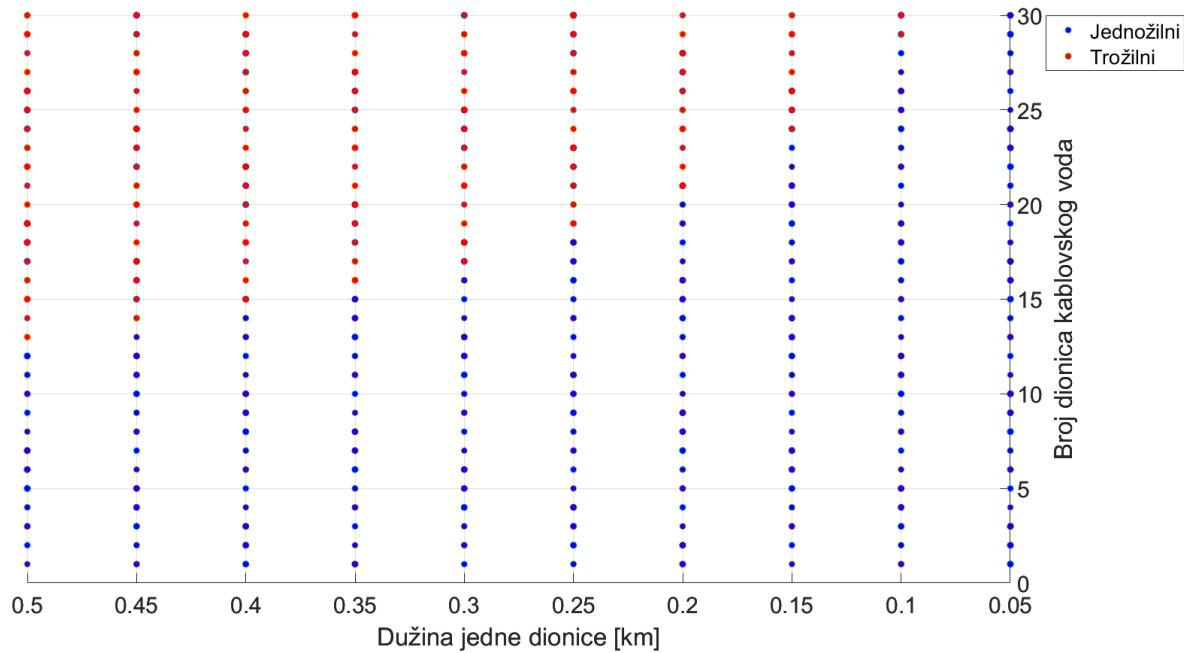
Slika 42. Efektivna vrijednost iznesenog napona poslednje susjedne TS-e u zavisnosti od dužine jedne dionice i ukupnog broja dionica jednožilnog 10 kV KV-a

Na slici 43 se uočava da, nakon određenog broja dionica (za njihove tačno određene dužine), trožilni KV iznosi veće vrijednosti napona, u odnosu na jednožilni kabl. Što je dužina dionica veća, ukupan broj dionica (nakon kog veće napone iznosi trožilni kabl) se smanjuje. Koeficijent iznesenog potencijala trožilnog kabla, kod poslednje TS-e, je veći, a impedansa metalne zaštite kabla niža (u odnosu na slučaj jednožilnog kabla). Napon uzemljivača, TS-e pogodene kvarom je niži kod trožilnog kabla. Impedansa metalne zaštite trožilnog kabla je niža, negoli kod jednožilnog. Razlikuje se u trećoj decimali za kraće vodove, a za duže u drugoj decimali. Kod dužih kablova, pri posmatranju poslednje TS-e do koje se iznose naponi, dominantniji uticaj ima koeficijent iznesenog potencijala. Kod kraćih kablova je veći uticaj napona uzemljivača TS-e, pogodene kvarom. Pri posmatranju iznesenih napona kod prve susjedne TS-e, dominantan uticaj ima napon uzemljivača – za sve dužine kabla. Za potrebe dobijanja grafika sa slike 43 i 44, korišćeni su KV-ovi iz opisa slika 41 i 39.



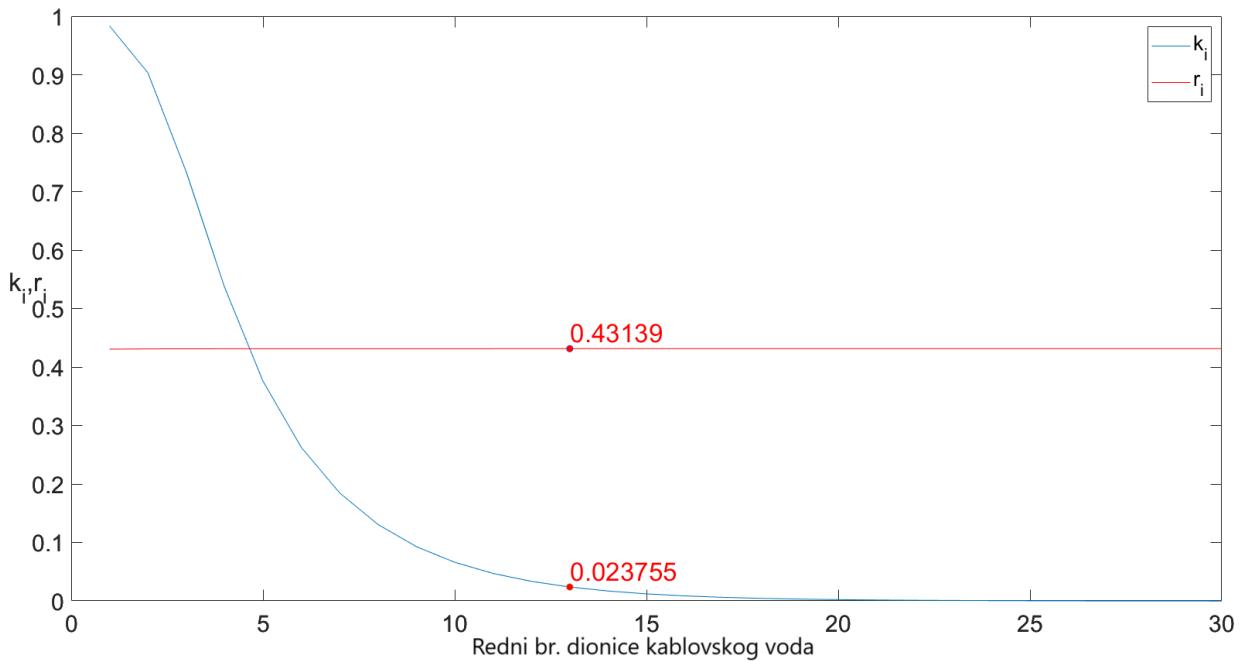
Slika 43. Efektivna vrijednost iznesenog napona poslednje susjedne TS u zavisnosti od broja dionica i dužine jedne dionice za slučaj jednožilnog i trožilnog 10 kV KV-a

Na slici 44 dat je pregled X – Y ravni grafika sa slike 43, radi boljeg pregleda dužina KV-a za koje je izneseni napon trožilnog kabla veći, negoli u slučaju jednožilnog. Pomenuti prelaz ne dešava uvijek za istu dužinu, već zavisi od svih parametara kabla.



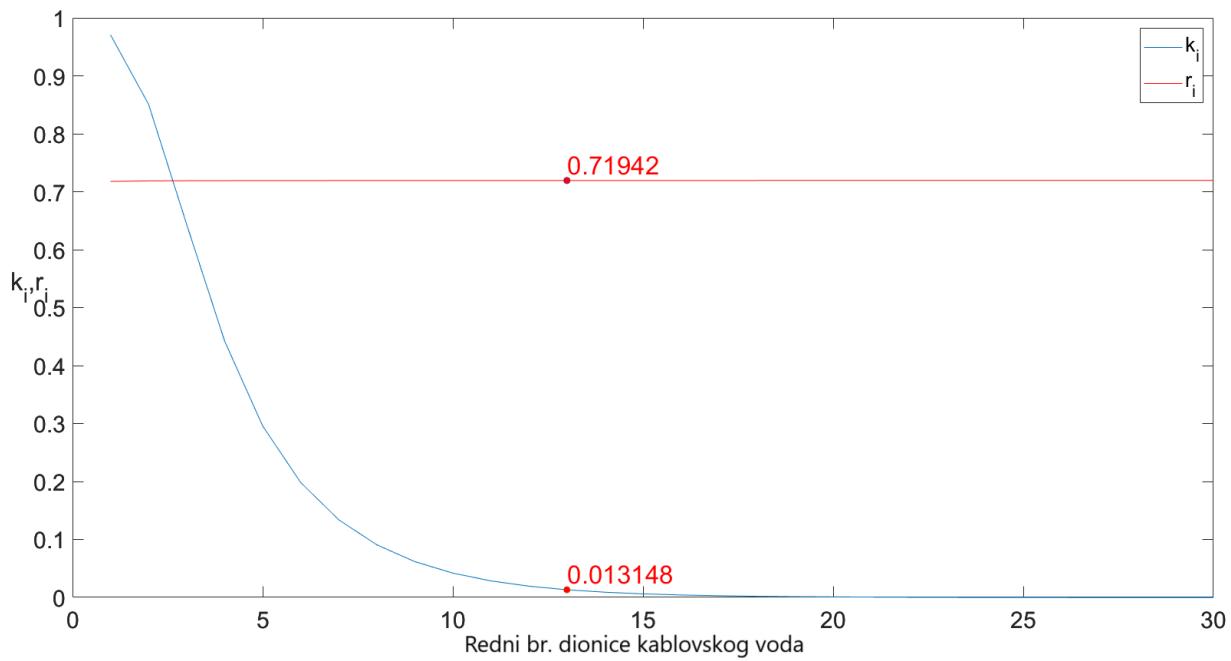
Slika 44. X – Y ravan grafika sa slike 43

Na slici 45 prikazan je koeficijent iznesenog potencijala i redukciono faktor trožilnog 10 kV KV-a. Za proračun je korišćen sledeći KV: trožilni - XHE 49/24 3x120/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra, specifična otpornost zemljišta je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je  $2 \Omega$ , poluprečnik provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $3 * 0.002 m$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 A$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 mm$ , korak uvijanja trake je  $30 mm$ , broj traka je 2, širina trake je  $9 mm$ , debljina jedne trake je  $1 mm$ .



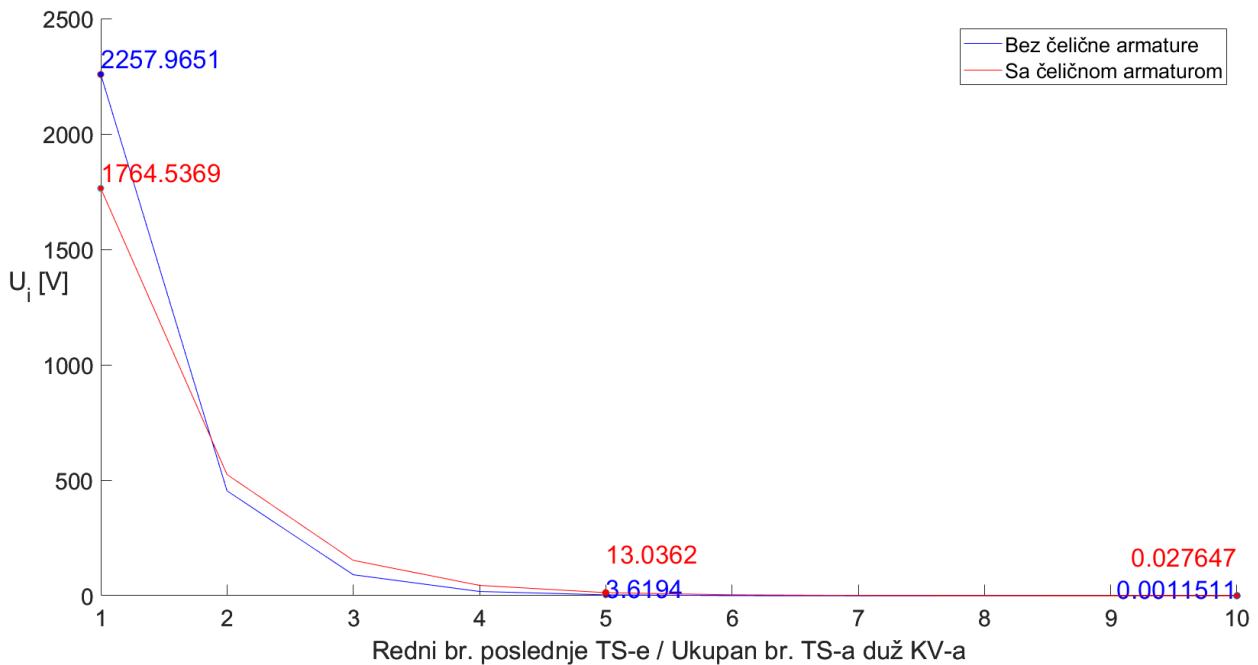
Slika 45. Koeficijent iznesenog potencijala i redukciono faktor trožilnog 10 kV KV-a

Na slici 46 je prikazan koeficijent iznesenog potencijala i redukciono faktor jednožilnog 10 kV KV-a. Uočava se da koeficijent iznesenog potencijala jednožilnog kabla brže opada sa porastom broja posmatrane kablovske dionice (odnosno TS-e), negoli u slučaju trožilnog. Zaključuje se da ovakvo ponašanje koeficijenta iznesenog potencijala izaziva isto ponašanje iznesenih napona (s obzirom na to da izneseni napon direktno zavisi od pomenutog koeficijenta). Sa druge strane, redukciono faktor jednožilnog kabla ima višu vrijednost, što znači da napon uzemljivača TS-e pogodjene kvarom ima višu vrijednost, negoli u slučaju trožilnog kabla. Izneseni napon je direktno srazmjeran pomenutom naponu uzemljivača. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $16 mm^2$ , specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je  $2 \Omega$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.002 m$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 A$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 mm$ , korak uvijanja trake je  $30 mm$ , broj traka je 2, širina trake je  $9 mm$ , debljina jedne trake je  $1 mm$ .

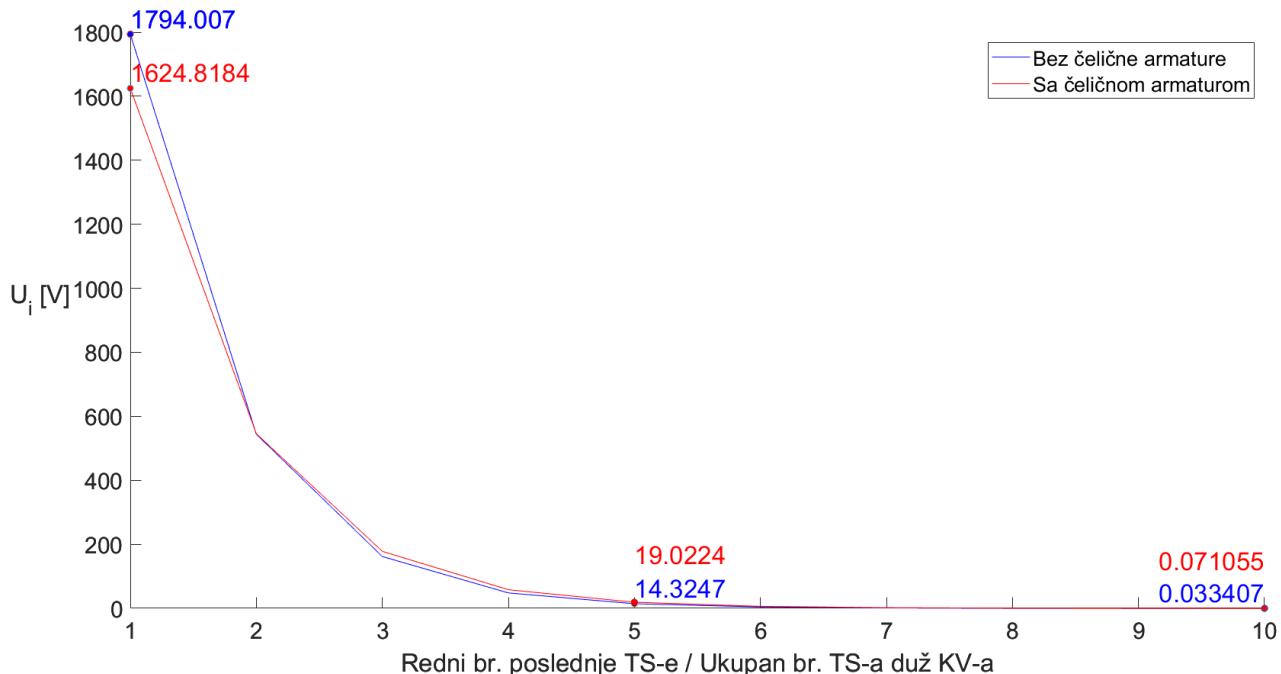


Slika 46. Koeficijent iznesenog potencijala i redukcioni faktor jednožilnog 10 kV KV-a

Na slikama 47 i 48 se može, respektivno za jednožilni i trožilni kabl, ispratiti uticaj prisustva armature na iznesene napone iz postrojenja, sa mogućnošću istovremenog praćenja iznesenog napona u zavisnosti od rednog broja posmatrane dionice kabla. Uočava se da armatura, do druge dionice, doprinosi smanjenju iznesenog napona (i to više u slučaju jednožilnog, negoli trožilnog kabla), dok je nakon druge dionice izneseni napon, uz prisustvo armature, viši (negoli kada armature nema, i to izraženje u slučaju jednožilnog kabla). Razlog je što, do druge dionice, dominira uticaj napona uzemljivača postrojenja pogodjenog kvarom (koji je veći kada armatura nema). Nakon druge dionice, dominira uticaj koeficijenta iznesenog potencijala (koji je veći kada je armatura prisutna). Za proračun su korišćeni sledeći KV-ovi: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plasti je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je 60 Ω \* m, efektivna vrijednost impedanse susjednih TS je 4 Ω, rezistansa TS u kojoj se dogodio kvar je 2 Ω, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, ukupna dužina KV-a je 5 km, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je 200 – j \* 2000 A. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm; trožilni - XHE 49/24 3x120/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plasti je od bakra, specifična otpornost zemljišta je 60 Ω \* m, efektivna vrijednost impedanse susjednih TS je 4 Ω, rezistansa TS u kojoj se dogodio kvar je 2 Ω, poluprečnik provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 3 \* 0.002 m, ukupna dužina KV-a je 5 km, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je 200 – j \* 2000 A. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.



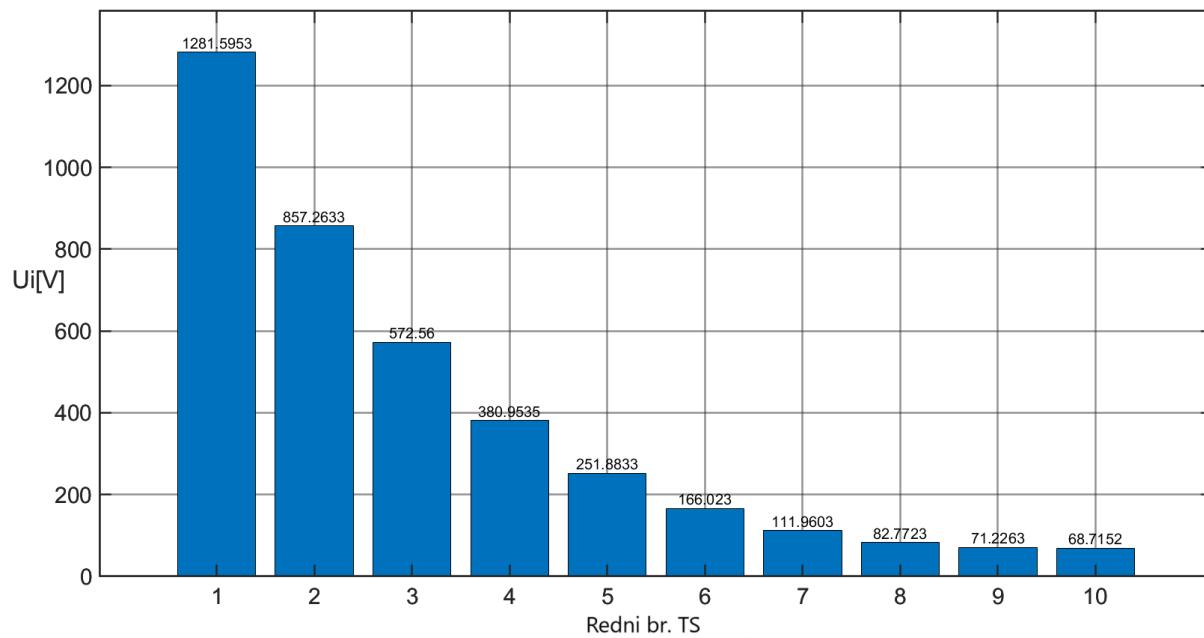
Slika 47. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje susjedne TS-e u zavisnosti od prisustva čelične armature i posmatrane TS-e jednožilnog KV-a



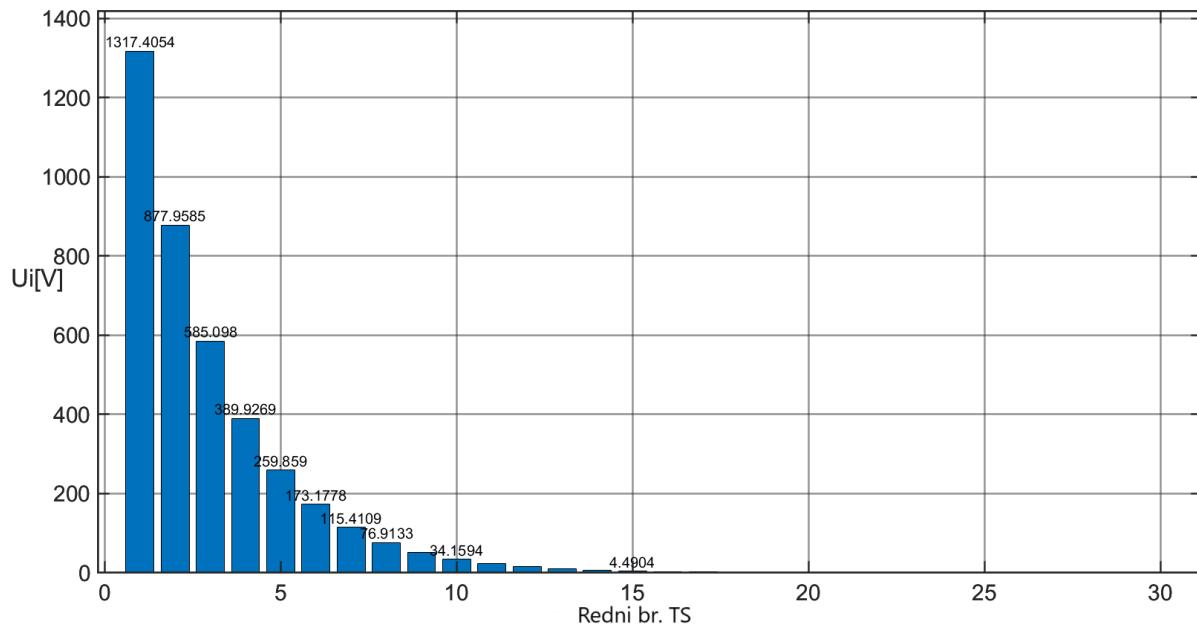
Slika 48. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje susjedne TS-e u zavisnosti od prisustva čelične armature i posmatrane TS-e trožilnog KV-a

Na slici 49 se može vidjeti efektivna vrijednost iznesenog napona na uzemljivaču svake TS-e duž KV-a. Vrijednosti napona eksponencijalno opadaju sa udaljavanjem od napojne TS-e, koja je

pogođena kvarom. Sa promjenom ukupnog broja TS-a, promijeniće se sve vrijednosti iznesenih napona i to se može zaključiti posmatranjem grafika sa slike 50. Kada je ukupan broj TS-a veći, vrijednost iznesenog napona prve TS-e je viša, a kod poslednjih TS-a u nizu - niža. Zaključak je da izneseni napon strmije opada, po eksponencijalnom zakonu, kod većeg broja kaskadno povezanih TS-a. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/36-A 3x1x400/35 mm<sup>2</sup> 20.8/36/42 kV. Metalni plastični poklopac je od bakra poprečnog presjeka 35 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je 60 Ω \* m, efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je 4 Ω, rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je 2 Ω, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.0015 m, dužina jedne dionice KV-a je 500 m, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j \cdot 2000$  A. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 800 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 12 mm, debljina jedne trake je 1.5 mm.

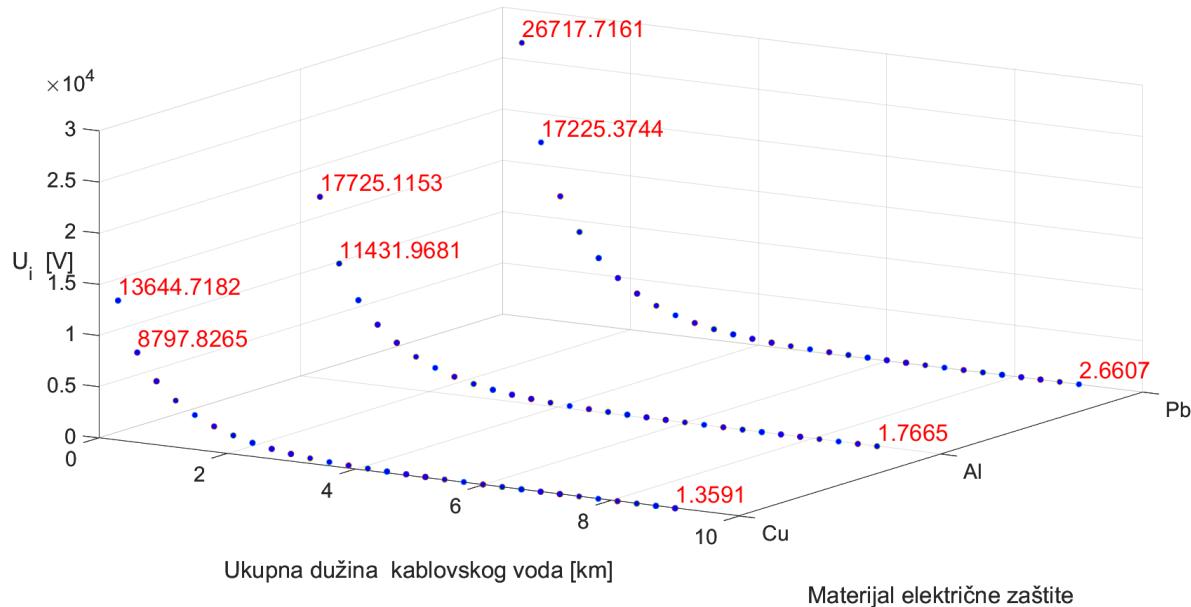


Slika 49. Efektivna vrijednost iznesenog napona u svim TS-a duž KV-a



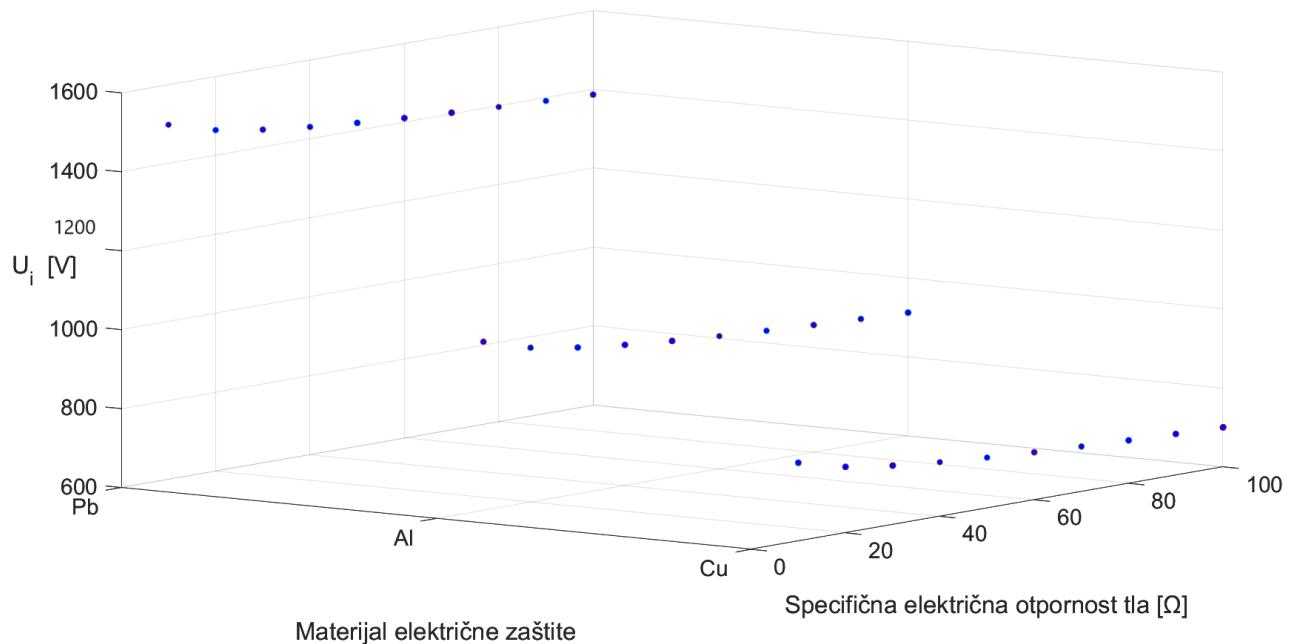
Slika 50. Efektivna vrijednost iznesenog napona u svim TS-a duž KV-a

Na slici 51 se uočava da su izneseni naponi minimalni za, najprovodniji među navedenim elementima, bakar (za slučajeve svih navedenih dužina kabla). Zatim slijedi aluminijum, dok se maksimalni izneseni naponi javljaju u slučaju kada je metalni plašt izrađen od olova (koji ima najnižu provodnost među tri pomenuta elementa). Za proračun je korišćen KV sledećih karakteristika: jednožilni - XHP 48/36-A 3x1x400/35 mm<sup>2</sup> 20.8/36/42 kV. Metalni plašt je poprečnog presjeka 35 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je  $2 \Omega$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.0015 m$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $1000 - j * 10000 A$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $800 mm$ , korak uvijanja trake je  $30 mm$ , broj traka je 2, širina trake je  $12 mm$ , debljina jedne trake je  $1.5 mm$ .



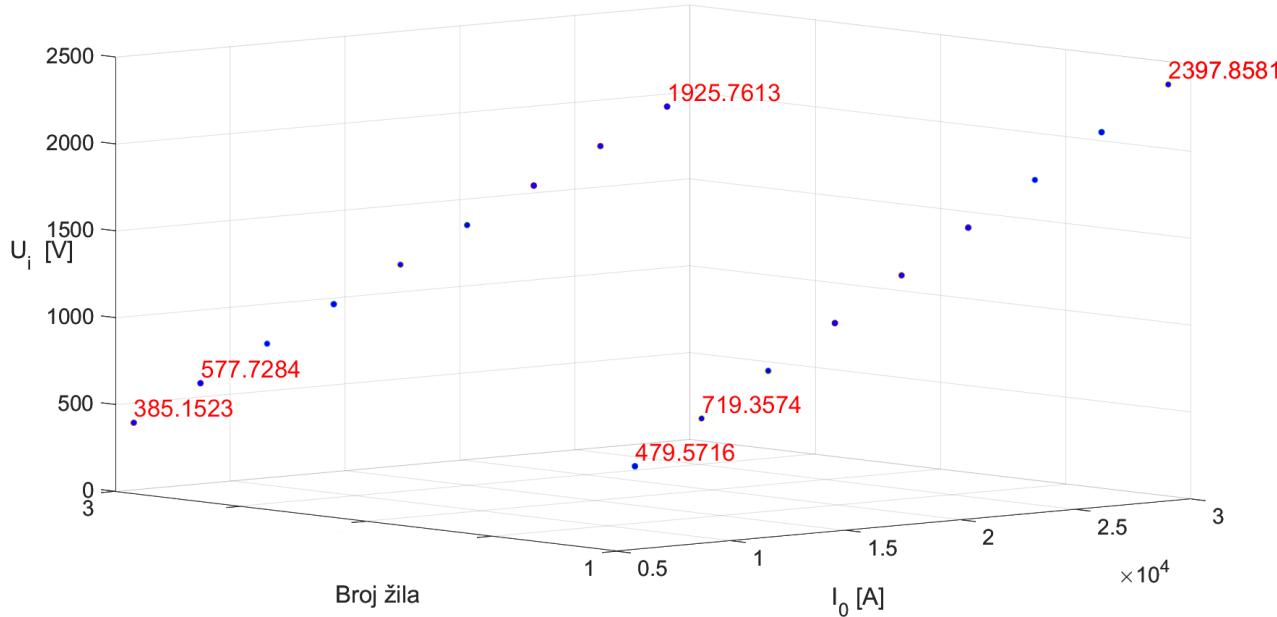
Slika 51. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od ukupne dužine KV-a i vrste materijala električnog plašta

Na slici 52 se uočava da se minimalni izneseni naponi javljaju kada je metalni plašt izrađen od bakra (među navedenima, bakar je najprovodniji), zatim slijedi aluminijum, dok se maksimalni naponi iznose u slučaju olova. Izneseni naponi blago opadaju, za svaki materijal metalnog plašta, sa povećanjem specifičnog električnog otpora tla. Taj pad je manji nakon  $40 \Omega * m$ . Za proračun je korišćen KV sledećih karakteristika: jednožilni - XHP 48/36-A 3x1x400/35 mm<sup>2</sup> 20.8/36/42 kV. Metalni plašt je poprečnog presjeka  $35 \text{ mm}^2$ , specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je  $2 \Omega$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.0015 \text{ m}$ , dužina jedne dionice KV-a je  $300 \text{ m}$ , ukupan broj dionica je  $10$ , kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $1000 - j * 10000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $800 \text{ mm}$ , korak uvijanja trake je  $30 \text{ mm}$ , broj traka je  $2$ , širina trake je  $12 \text{ mm}$ , debljina jedne trake je  $1.5 \text{ mm}$ .



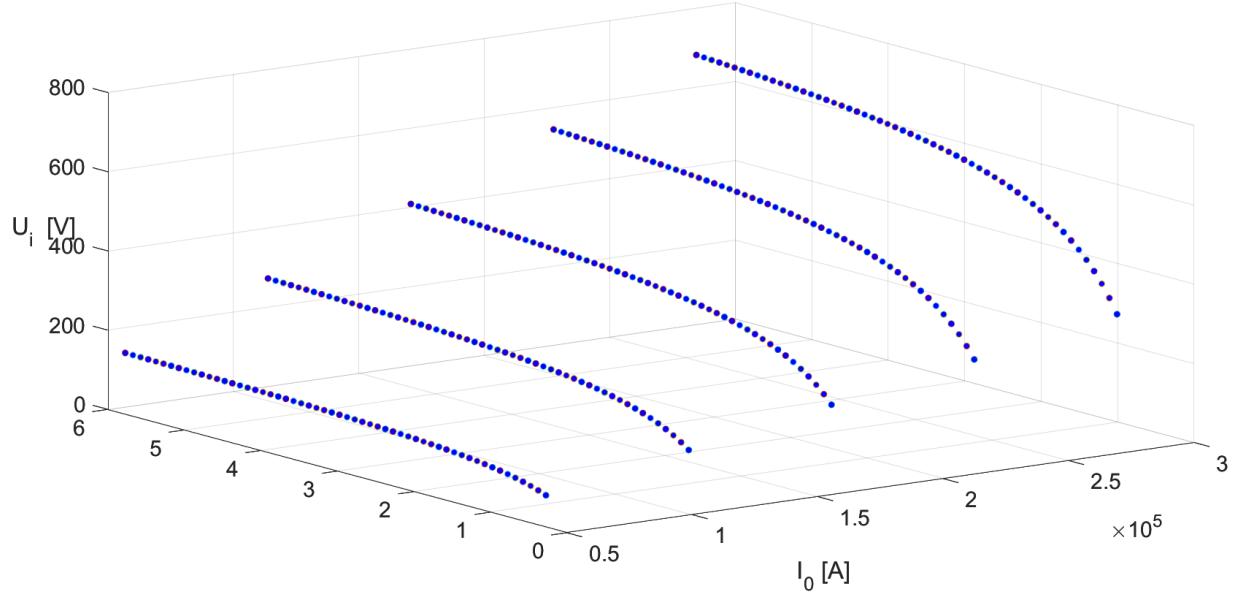
Slika 52. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od vrste materijala metalnog plašta i specifične električne otpornosti tla

Na slici 53 se može vidjeti na koji način se ponašaju vrijednosti iznesenog napona u zavisnosti od efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara (sa porastom pomenute struje, izneseni naponi rastu linearno, u slučaju i jednožilnog i trožilnog KV-a). Za proračun su iskorišćeni sledeći KV-ovi: trožilni - XHE 49/24 3x120/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV i jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična otpornost zemljišta je 60 Ω \* m, efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je 4 Ω, rezistansa TS-e u kojoj se dogodio kvar je 2 Ω, poluprečnik provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, ukupna dužina KV-a je 3 km, ukupan broj dionica je 10. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.



Slika 53. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od broja žila KV-a i efektivne vrijednosti nulte komponente struje kratkog spoja

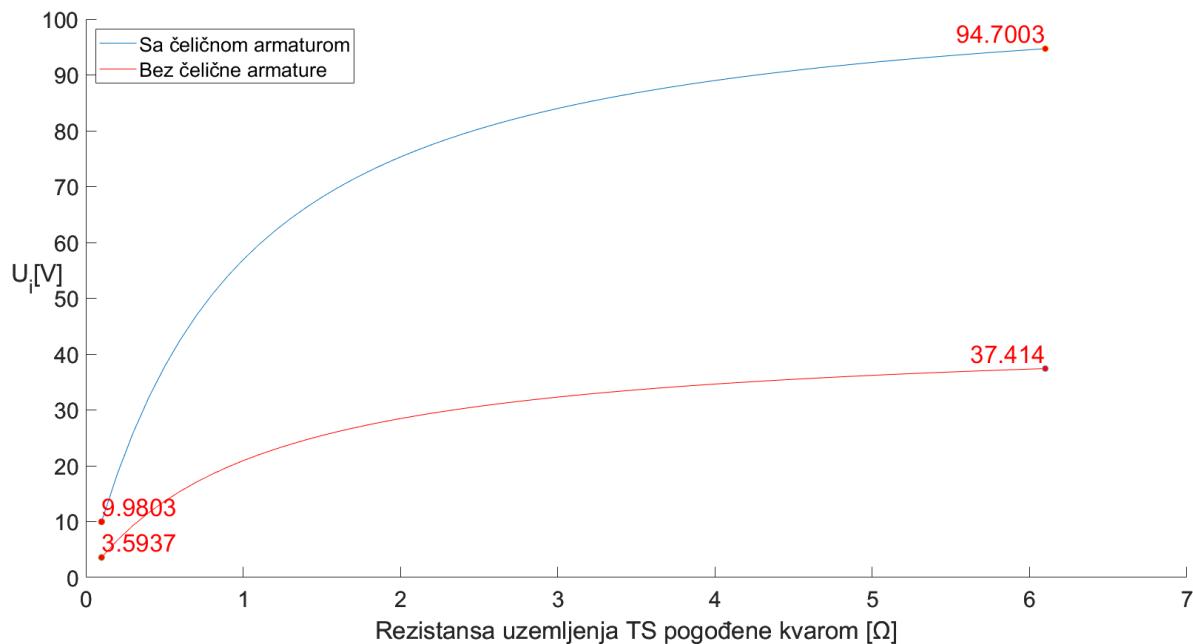
Na slici 54 se uočava da izneseni napon kvadratno raste sa porastom impedanse TS-e pogodjene kvarom, do vrijednosti od oko  $1 \Omega$  (za niže struje), odnosno do vrijednosti od oko  $2 \Omega$  (za više struje). Nakon te vrijednosti, porast iznesenog potencijala je blaži, tačnije blago linearan. Sa porastom efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara, izneseni napon linearno raste. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.002 m$ , ukupna dužina KV-a je  $3 km$ , ukupan broj dionica je 10. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 mm$ , korak uvijanja trake je  $30 mm$ , broj traka je 2, širina trake je  $9 mm$ , debljina jedne trake je  $1 mm$ .



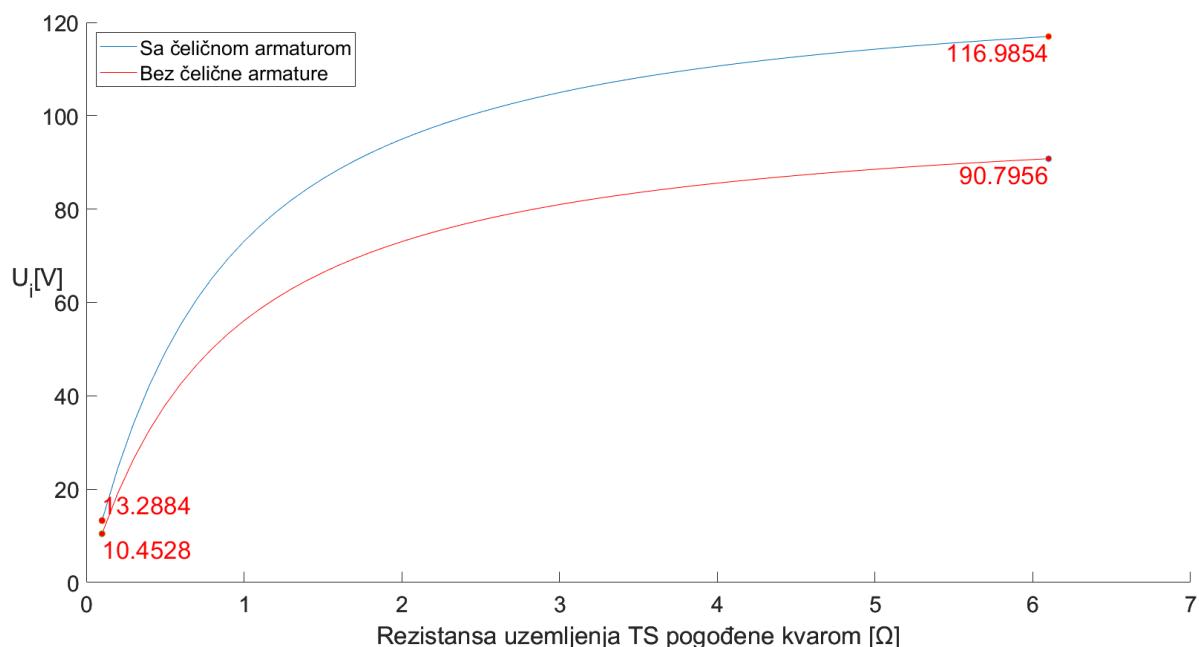
Rezistansa uzemljenja TS pogođene kvarom  $[\Omega]$

Slika 54. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od rezistanse uzemljenja TS-e pogođene kvarom i efektivne vrijednosti nulte komponente struje kratkog spoja

Sa slike 55 se može vidjeti da izneseni napon jednožilnog kabla raste kvadratno, sa povećanjem vrijednosti impedanse uzemljenja TS-e pogođene kvarom do vrijednosti  $2.5 \Omega$ , u slučaju prisustva armature. U slučaju kada kabl nema armaturu, izneseni napon raste kvadratno, sa povećanjem vrijednosti impedanse uzemljenja TS-e pogođene kvarom do vrijednosti od  $1.5 \Omega$ . Izneseni naponi su veći u slučaju kabla sa armaturom, što je objašnjeno opisom vezanim za slike 47 i 48. Na slici 56 je prikazana ista funkcionalna zavisnost iznesenog napona kao i na slici 55, s tom razlikom što je kabl trožilan. Upoređujući grafike jednožilnog i trožilnog kabla, zaključuje se da prisustvo armatura značajnije uvećava iznesene napone u slučaju jednožilnog kabla. Za proračun su korišćeni sledeći KV-ovi: trožilni - XHE 49/24 3x120/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV i jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plasti je od bakra poprečnog presjeka  $16 \text{ mm}^2$ , specifična otpornost zemljišta je  $60 \Omega * m$ , efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.002 \text{ m}$ , ukupna dužina KV-a je  $5 \text{ km}$ , ukupan broj dionica je 10, efektivna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 \text{ mm}$ , korak uvijanja trake je  $30 \text{ mm}$ , broj traka je 2, širina trake je  $9 \text{ mm}$ , debljina jedne trake je  $1 \text{ mm}$ .



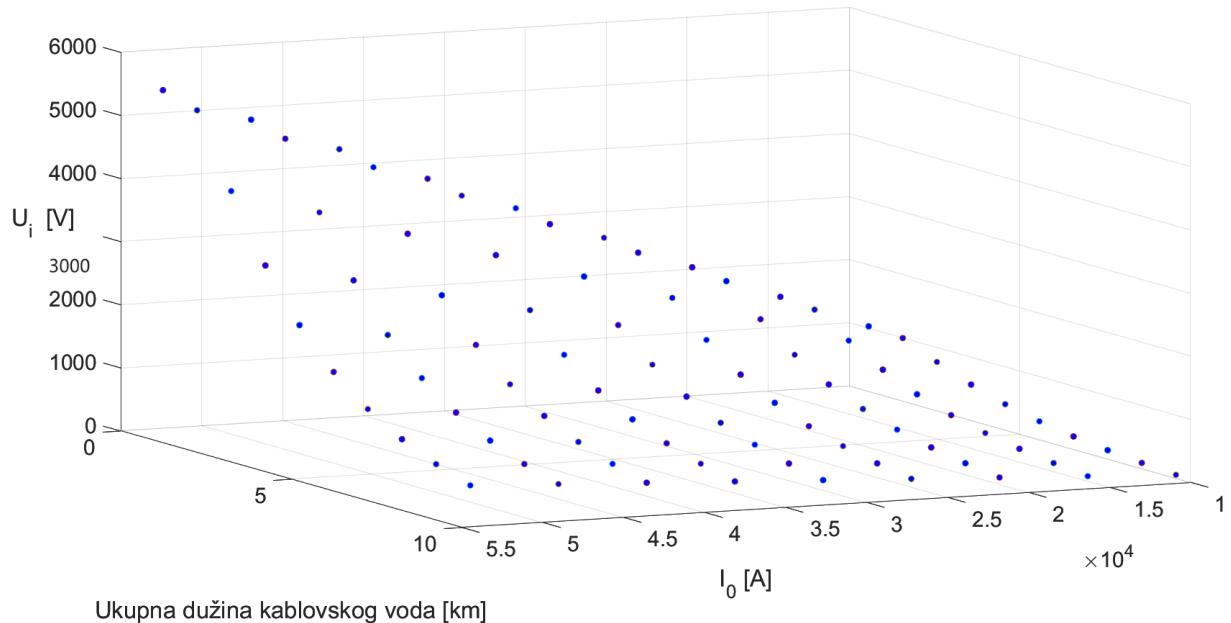
Slika 55. Efektivna vrijednost iznesenog napona jednožilnim kablom do poslednje TS-e u zavisnosti od rezistanse uzemljenja TS-e pogodjene kvarom i prisustva armature



Slika 56. Efektivna vrijednost iznesenog napona trožilnim kablom do poslednje TS-e u zavisnosti od rezistanse uzemljenja TS-e pogodjene kvarom i prisustva armature

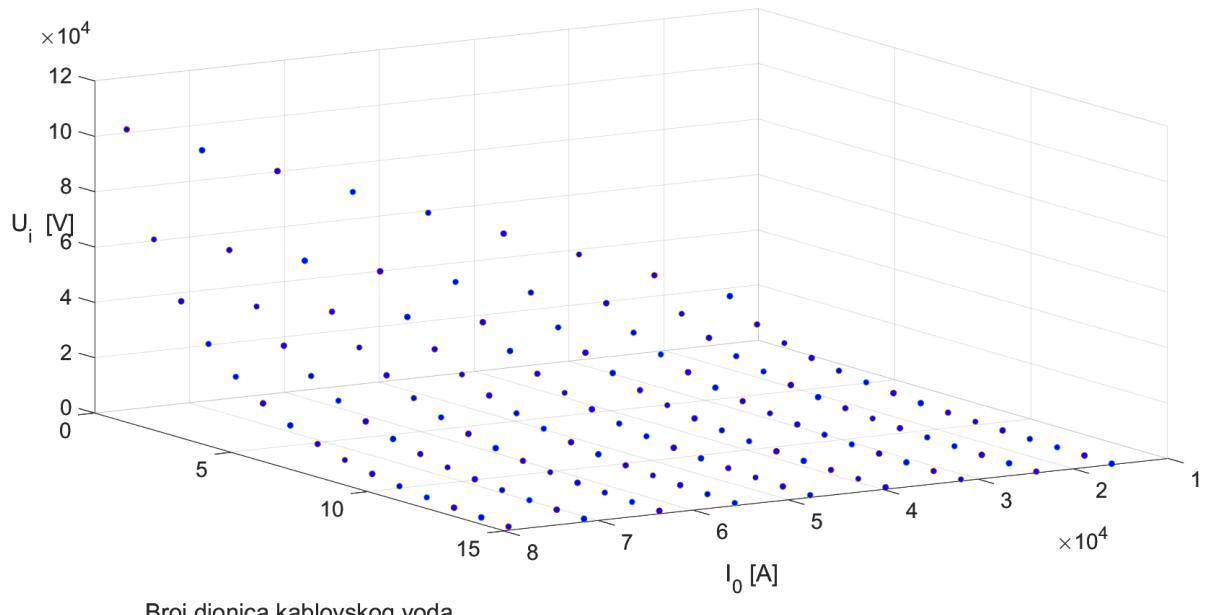
Na slici 57 se uočava da izneseni napon linearno raste sa povećanjem nulte komponente struje kvara, i to vrlo izraženo za manje dužine. Za veće dužine kabla, pomenuti rast iznesenog napona je znatno blaži. Zaključak je da povećanje dužine kabla smanjuje intenzitet uticaja struje kvara na izneseni napon. Sa povećanjem dužine, izneseni napon opada i taj pad je najdrastičniji u slučaju velikih struja.

Zaključak je da niske vrijednosti struje kvara smanjuju uticaj povećanja dužine kabla na izneseni napon. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična otpornost zemljišta je 60 Ω \* m, efektivna vrijednost impedanse susjednih TS- je 4 Ω, rezistansa uzemljenja TS-e pogodene kvarom je 2 Ω, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, ukupan broj dionica je 10. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.



Slika 57. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara i ukupne dužine KV-a

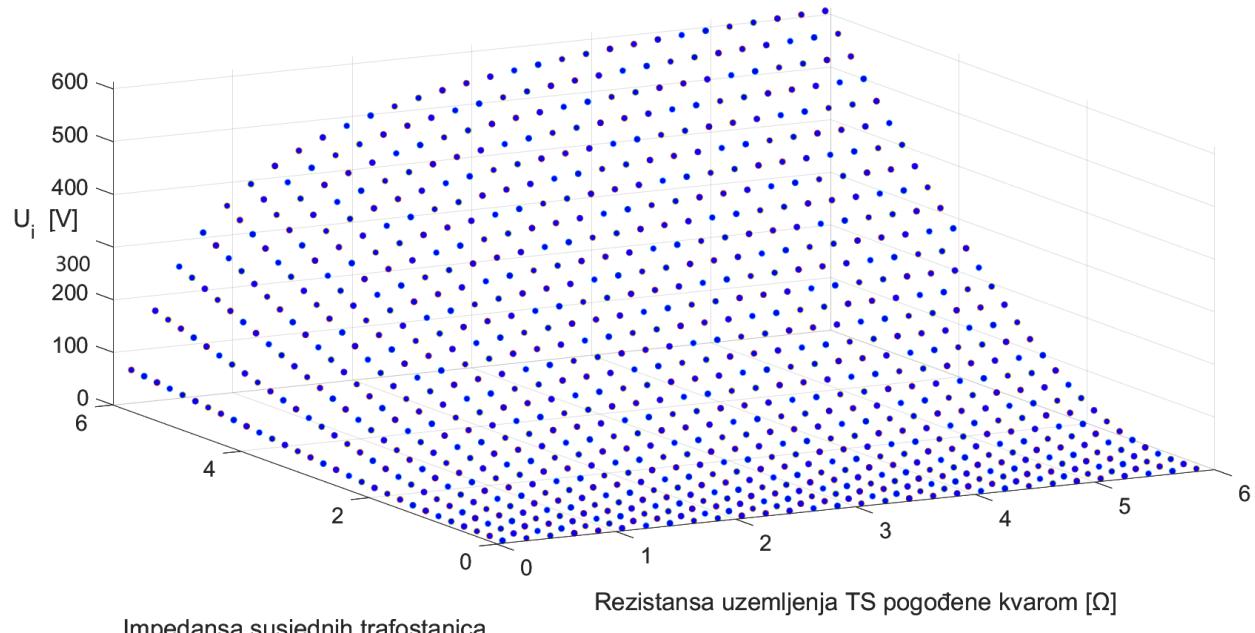
Na slici 58 se uočava da izneseni napon linearno raste sa povećanjem nulte komponente struje kvara, i to drastično za manji broj dionica. Za veći broj dionica kabla, pomenuti rast iznesenog napona je znatno blaži. Zaključak je da veći broj dionica kabla čini uticaj struje kvara manjim na izneseni napon. Sa povećanjem broja dionica kabla, izneseni napon opada i taj pad je najdrastičniji u slučaju velikih struja kvara. Zaključak je da visoke vrijednosti struje kvara povećavaju uticaj ukupnog broja dionica kabla na iznesene napone. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična otpornost zemljišta je 60 Ω \* m, efektivna vrijednost impedanse susjednih TS-a je 4 Ω, rezistansa uzemljenja TS-e pogodene kvarom je 2 Ω, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, dužina jedne dionice je 300 m. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.



Broj dionica kablovskog voda

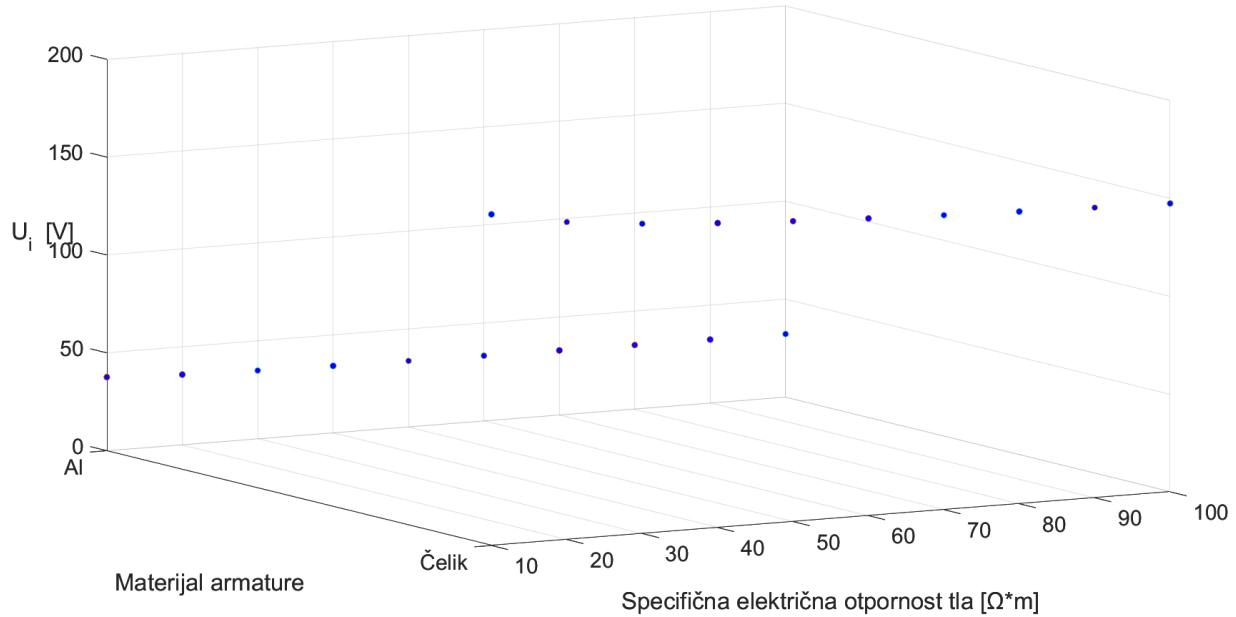
Slika 58. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od efektivne vrijednosti nulte komponente struje kratkog spoja i broja dionica KV-a

Na slici 59 se uočava da izneseni napon raste, prvo kvadratno, a zatim linearno, sa povećanjem impedanse TS-e pogodjene kvarom. Sa povećanjem impedanse susjednih TS-a (u praksi su te impedanse često različite međusobno, pa se u proračunu uzima njihova aritmetička sredina) izneseni napon linearno raste. Mala impedansa TS-e pogodjene kvarom čini izneseni napon manje osjetljivim na povećanje impedansi susjednih TS-a. Takođe, male impedanse susjednih TS-a čine izneseni napon manje osjetljivim na povećanje impedanse TS-e pogodjene kvarom. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plastični pancer je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična otpornost zemljišta je 60 Ω \* m, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, dužina jedne dionice je 300 m, ukupan broj dionica KV-a je 10, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je 200 – j \* 2000 A. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.



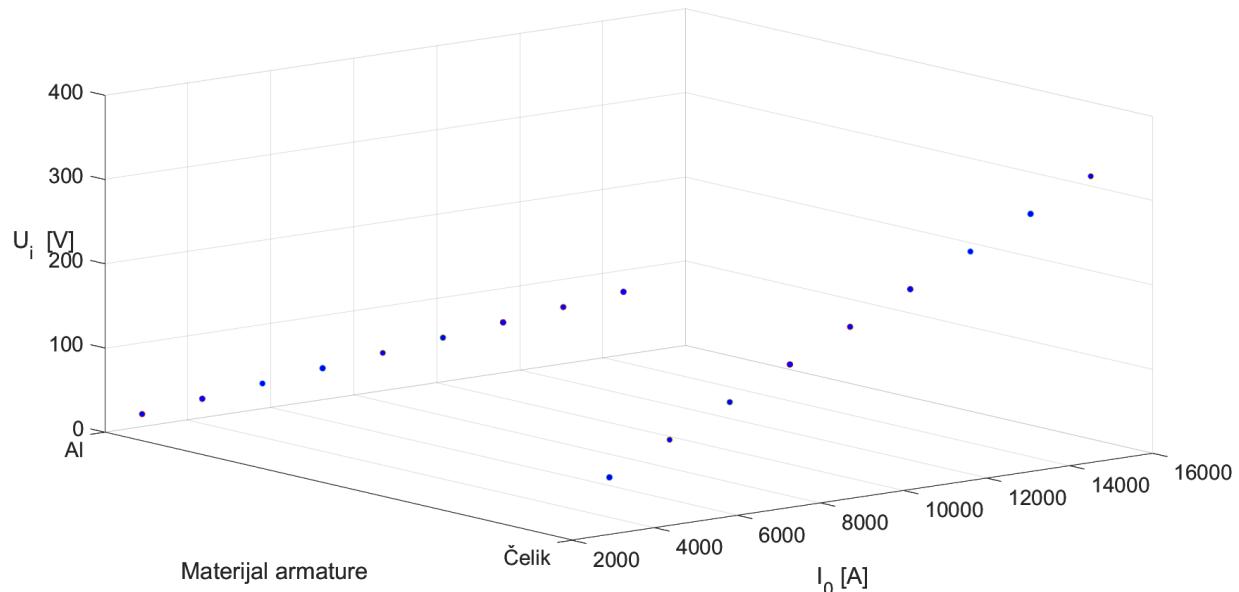
Slika 59. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od rezistanse uzemljenja TS-e pogodjene kvarom i efektivne vrijednosti impedansi susjednih TS-a

Na slici 60 se uočava da se veći izneseni naponi javljaju kada je armatura od čelika, negoli kada je od aluminijuma (aluminijum je provodniji). Sa povećanjem specifične električne otpornosti tla, izneseni naponi, za oba primjera armature, blago opadaju. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, rezistansa TS-e pogodjene kvarom je 2 Ω, efektivna vrijednost impedansi susjednih TS-a je 4 Ω, dužina jedne dionice je 300 m, ukupan broj dionica KV-a je 10, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je 200 – j \* 2000 A. Podaci o armaturi: srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.



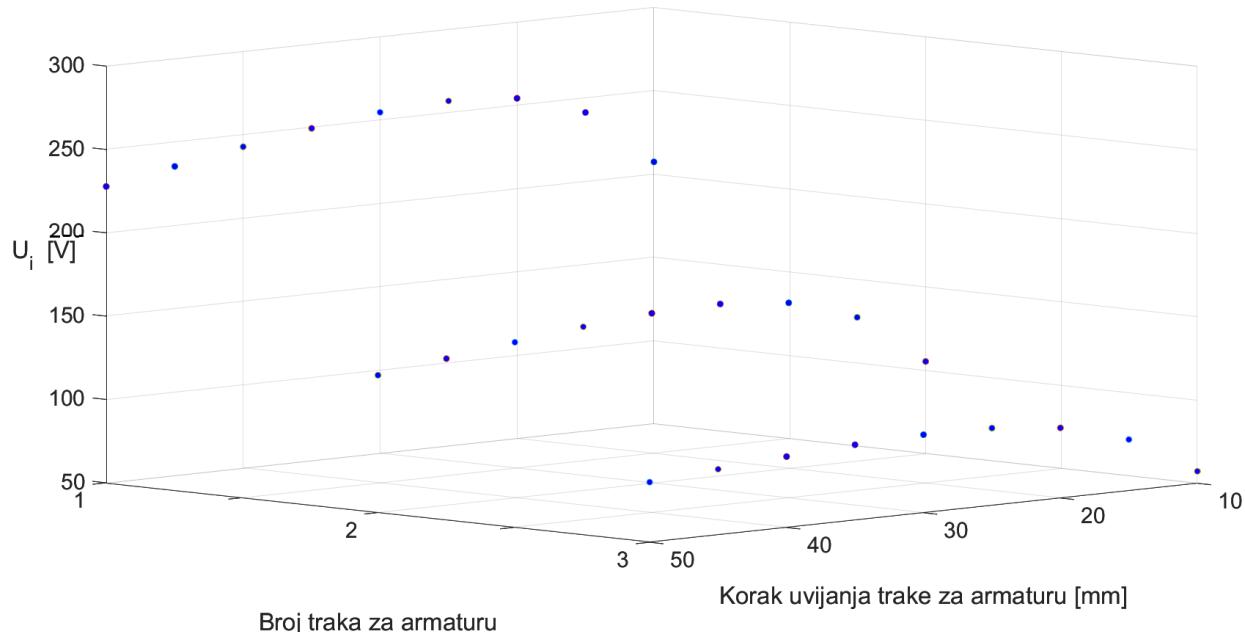
Slika 60. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od materijala armatura i specifične električne otpornosti tla

Na slici 61 se može uvidjeti da, sa porastom efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara, izneseni naponi drastično rastu, za slučaj čelične armature. U slučaju aluminijumske armature, sa povećanjem efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara, porast iznesenih napona je znatno blaži. Korišćen je sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je 60  $\Omega \cdot m$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 0.002 m, rezistansa TS-e pogodjene kvarom je 2  $\Omega$ , efektivna vrijednost impedansi susjednih TS-a je 4  $\Omega$ , dužina jedne dionice je 300 m, ukupan broj dionica KV-a je 10. Podaci o armaturi: srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.

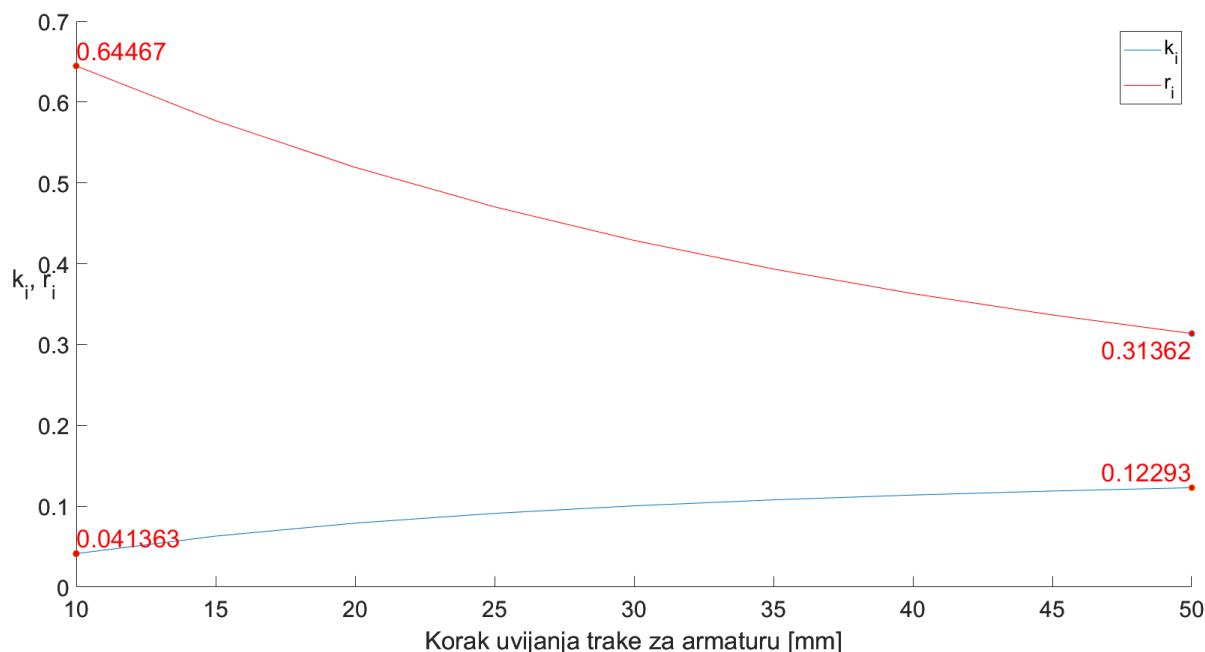


Slika 61. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od materijala armatura i efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara

Sa slike 62 se uočava da izneseni napon ima manju vrijednost kada se koristi veći broj armaturnih traka. Sa porastom koraka uvijanja trake (do vrijednosti od oko  $25\text{ mm}$ ), izneseni napon kvadratno raste. Nakon toga, izneseni napon blago opada. Ova promjena se dešava iz razloga što se sa promjenom udaljenosti između navojaka trake mijenja intezitet uticaja redukcinog faktora i koeficijenta iznesenog potencijala (pogledati sliku 63). Za veće vrijednsoti (iznad  $25\text{ mm}$ ) koraka uvijanja trake, dominira efekat smanjenja redukcionog faktora, samim tim smanjenja napona uzemljivača TS-e pogodene kvarom. Za manje vrijednosti (ispod  $25\text{ mm}$ ) koraka uvijanja trake, dominira uticaj povećanja koeficijenta iznesenog potencijala. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A  $3 \times 1 \times 95/16\text{ mm}^2$  6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $16\text{ mm}^2$ , specifična električna otpornost tla je  $60\text{ }\Omega \cdot m$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.002\text{ m}$ , rezistansa TS-e pogodene kvarom je  $2\text{ }\Omega$ , efektivna vrijednost impedansi susjednih TS-a je  $4\text{ }\Omega$ , dužina jedne dionice je  $300\text{ m}$ , ukupan broj dionica KV-a je 10, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000\text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500\text{ mm}$ , širina trake je  $9\text{ mm}$ , debљina jedne trake je  $1\text{ mm}$ .



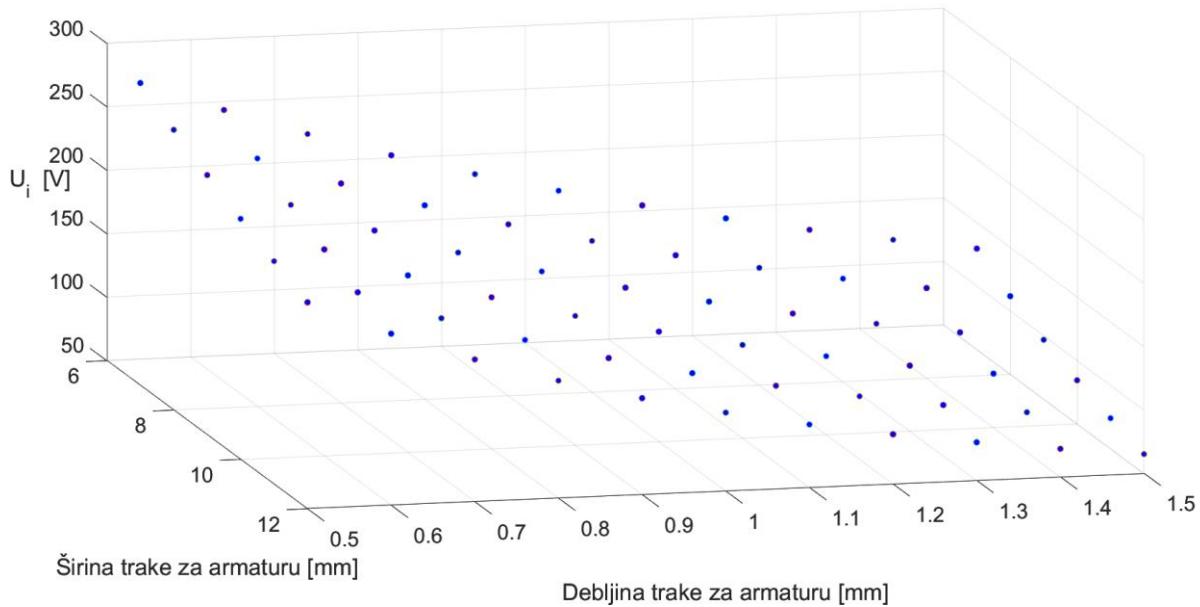
Slika 62. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od broja traka za armaturu i njihovog koraka uvijanja



Slika 63. Koeficijent iznesenog potencijala i redukcion faktor KV-a

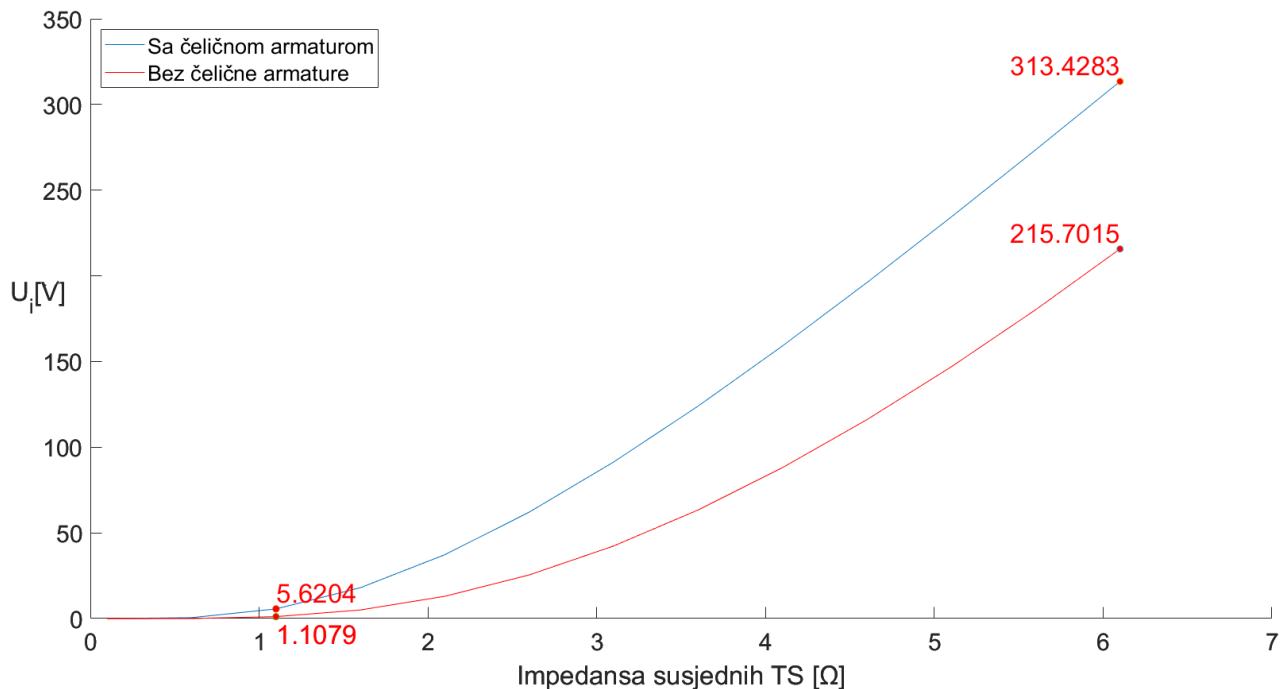
Na slici 64 se uočava da izneseni napon linearno opada sa povećanjem širine armaturne trake. Takođe, izneseni napon se smanjuje sa povećanjem debljine armaturne trake, i to izraženje za trake male širine. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A 3x1x95/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je 60 Ω \* m, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz

zemlju je  $0.002 \text{ m}$ , rezistansa TS-e pogodjene kvarom je  $2 \Omega$ , efektivna vrijednost impedansi susjednih TS-a je  $4 \Omega$ , dužina jedne dionice je  $300 \text{ m}$ , ukupan broj dionica KV-a je 10, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 \text{ mm}$ , korak uvijanja trake je  $30 \text{ mm}$ , broj traka je 2.



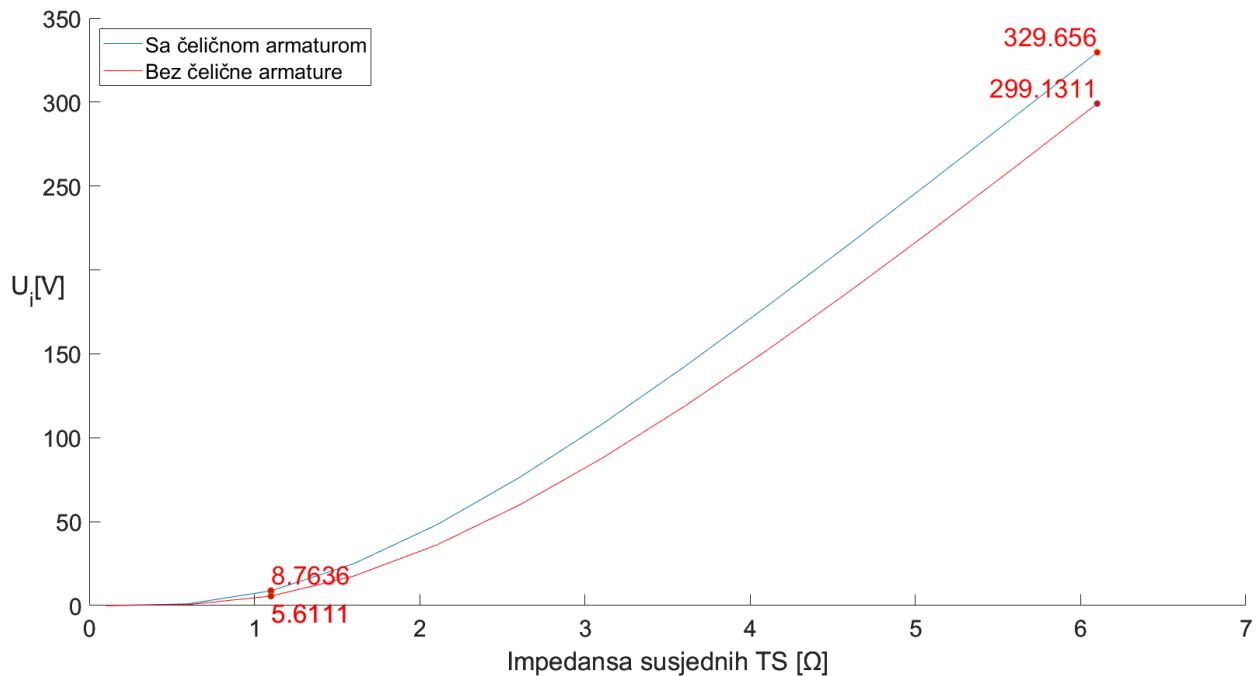
Slika 64. Efektivna vrijednost iznesenog napona do poslednje TS-e u zavisnosti od širine i debljine trake za armaturu

Na slici 65 se uočava da su izneseni naponi (kod poslednje TS-e) viši, u slučaju prisustva armature, i da eksponencijalno rastu sa porastom efektivne vrijednosti impedansi susjednih TS-a. Pri iznošenju napona, uticaj prisustva armatura je veći za veće impedanse susjednih TS-a. Za proračun je korišćen sledeći KV: jednožilni - XHP 48/O-A  $3x1x95/16 \text{ mm}^2$  6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $16 \text{ mm}^2$ , specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * \text{m}$ , poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je  $0.002 \text{ m}$ , rezistansa TS-e pogodjene kvarom je  $2 \Omega$ , dužina jedne dionice je  $300 \text{ m}$ , ukupan broj dionica KV-a je 10, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $200 - j * 2000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je  $500 \text{ mm}$ , korak uvijanja trake je  $30 \text{ mm}$ , broj traka je 2, širina trake je  $9 \text{ mm}$ , debljina jedne trake je  $1 \text{ mm}$ .



Slika 65. Efektivna vrijednost iznesenog napona jednožilnim kablom do poslednje TS-e u zavisnosti od efektivne vrijednosti impedansi susjednih TS-a i prisustva armature

Na slici 66, analogno grafiku sa slike 65, se uočava da su izneseni naponi veći u slučaju prisustva armatura i da je njen uticaj izraženiji za veće vrijednosti impedansi susjednih TS-a. Bitna razlika između jednožilnog i trožilnog KV-a jeste u tome da armatura, kod jednožilnog kabla i za visoke impedanse susjednih TS-a, više utiče na povećanje iznesenih napona. Za proračun je korišćen sledeći KV: trožilni - XHE 49/24 3x120/16 mm<sup>2</sup> 6/10/12 kV. Metalni plastični potez je od bakra poprečnog presjeka 16 mm<sup>2</sup>, specifična električna otpornost tla je 60 Ω \* m, poluprečnik ekvivalentnog provodnika metalne zaštite, armatura i povratnog puta kroz zemlju je 3 \* 0.002 m, rezistansa TS-e pogodjene kvarom je 2 Ω, dužina jedne dionice je 300 m, ukupan broj dionica KV-a je 10, kompleksna vrijednost nulte komponente struje kvara je 200 – j \* 2000 A. Podaci o armaturi: materijal je čelik, srednji prečnik zavojnice koju obrazuju trake je 500 mm, korak uvijanja trake je 30 mm, broj traka je 2, širina trake je 9 mm, debljina jedne trake je 1 mm.

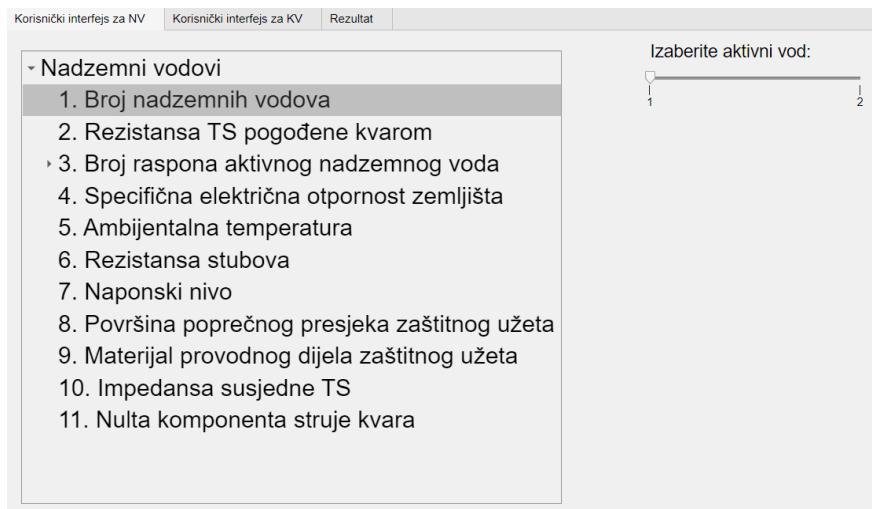


Slika 66. Efektivna vrijednost iznesenog napona trožilnim kablom do poslednje TS-e u zavisnosti od efektivne vrijednosti impedanse susjednih TS-a i prisustva armature

## 6.5 Graphical User Interface i analiza uticaja uklopnog stanja na iznesene napone

Za potrebe ovog rada razvijen je program u softverskom paketu MATLAB. Na to je nadovezan Graphical User Interface (GUI), razvijen u sklopu MATLAB-ovog App Designer-a. GUI omogućava interakciju korisnika sa pozadinskim programom, koji računa iznesene napone iz VNRP-a pogodjenog kvarom. Tom interakcijom se, unošenjem svih već pomenutih parametara zaštitnih užadi NV-ova i/ili metalnih zaštita KV-ova, dobijaju izlazni naponi do susjednih VNRP-a. Korisnik, pored odabira parametara, može birati broj i tip vodova koji su u pogonu.

Na slikama 67 – 74 je dat prikaz reprezentativnog dijela MATLAB-ovog grafičkog interfejsa (GUI-a). On se sastoji iz tri prozora, od kojih je prvi namijenjen unošenju podataka za NV-ove. Prvo se unese broj NV-ova i impedansa uzemljenja TS-e pogodjene kvarom, a zatim se unose parametri od interesa za svaki NV pojedinačno. Analogno prvom prozoru, drugi se koristi za unos podataka vezanih za KV-ove, dok se na trećem prozoru (pritiskom dugmeta REZULTAT) dobija grafik sa prikazom efektivnih vrijednosti iznesenih napona na kraju svakog definisanog voda.



Slika 67. Korisnički interfejs za NV-ove (prikaz broja NV-ova)

This screenshot continues from Slika 67. It shows the same user interface for NV inputs. The tree view on the left now includes the item '3. Broj raspona aktivnog nadzemnog voda' expanded, with its sub-items: 2.1. Dužine raspona, 4. Specifična električna otpornost zemljišta, 5. Ambijentalna temperatura, 6. Rezistansa stubova, 7. Naponski nivo, 8. Površina poprečnog presjeka zaštitnog užeta, 9. Materijal provodnog dijela zaštitnog užeta, 10. Impedansa susjedne TS, and 11. Nulta komponenta struje kvara. To the right of the tree view is a section titled 'Izaberite aktivni vod:' with a slider control. Below it is a table for entering values, with the first row labeled 'Dužine raspona [km]:' and containing two columns with values '1' and '2'. A blue selection bar highlights the value '0.1' in the second column. At the bottom right of the table area is a button labeled 'Podešeno'.

Slika 68. Korisnički interfejs za NV-ove (prikaz tabele za unos dužina raspona prvog NV-a)

Korisnički interfejs za NV    Korisnički interfejs za KV    Rezultat

- Nadzemni vodovi
- 1. Broj nadzemnih vodova
- 2. Rezistansa TS pogođene kvarom
- 3. Broj raspona aktivnog nadzemnog voda
- 4. Specifična električna otpornost zemljišta
- 5. Ambijentalna temperatura
- 6. Rezistansa stubova
- 7. Naponski nivo**
- 8. Površina poprečnog presjeka zaštitnog užeta
- 9. Materijal provodnog dijela zaštitnog užeta
- 10. Impedansa susjedne TS
- 11. Nulta komponenta struje kvara

Izaberite aktivni vod:

Odaberite naponski nivo:

35 kV

110 kV

220 kV

400 kV

Slika 69. Korisnički interfejs za NV-ove (odabir naponskog nivoa trećeg NV-a)

Korisnički interfejs za NV    Korisnički interfejs za KV    Rezultat

- Nadzemni vodovi
- 1. Broj nadzemnih vodova
- 2. Rezistansa TS pogođene kvarom
- 3. Broj raspona aktivnog nadzemnog voda
- 4. Specifična električna otpornost zemljišta
- 5. Ambijentalna temperatura
- 6. Rezistansa stubova
- 7. Naponski nivo**
- 8. Površina poprečnog presjeka zaštitnog užeta
- 9. Materijal provodnog dijela zaštitnog užeta
- 10. Impedansa susjedne TS
- 11. Nulta komponenta struje kvara

Izaberite aktivni vod:

Odaberite materijal zaštitnog užeta:

Al

Cu

Čelik

Slika 70. Korisnički interfejs za NV-ove (odabir materijala zaštitnog užeta prvog NV-a)

Korisnički interfejs za NV    Korisnički interfejs za KV    Rezultat

‑ Kablovski vodovi

- 1. Broj kablovskih vodova
- 2. Rezistansa TS pogodene kvarom
- 3. Broj dionica aktivnog kablovskog voda**
- 2.1. Dužine dionica
- 4. Specifična električna otpornost zemljišta
- 5. Tip kabla po broju žila
- 6. Materijal električne zaštite
- 7. Površina poprečnog presjeka električne zaštite
- 8. Prisustvo armature kabla
- 9. Impedansa susjednih TS
- 10. Nulta komponenta struje kvara

Izaberite aktivni vod:

|                      |     |      |   |   |
|----------------------|-----|------|---|---|
| Dužine dionica [km]: | 1   | 2    | 3 | 4 |
|                      | 0.1 | 0.05 |   |   |

Podešeno

Slika 71. Korisnički interfejs za KV-ove (pričekivanje tabele za unos dužina dionica drugog KV-a)

Korisnički interfejs za NV    Korisnički interfejs za KV    Rezultat

‑ Kablovski vodovi

- 1. Broj kablovskih vodova
- 2. Rezistansa TS pogodene kvarom
- 3. Broj dionica aktivnog kablovskog voda**
- 4. Specifična električna otpornost zemljišta
- 5. Tip kabla po broju žila**
- 6. Materijal električne zaštite
- 7. Površina poprečnog presjeka električne zaštite
- 8. Prisustvo armature kabla
- 9. Impedansa susjednih TS
- 10. Nulta komponenta struje kvara

Izaberite aktivni vod:

Odaberite br. žila kabla:

Jedna žila.

Tri žile.

Slika 72. Korisnički interfejs za KV-ove (odabir broja žila drugog KV-a)

Korisnički interfejs za NV    Korisnički interfejs za KV    Rezultat

- Kablovski vodovi

1. Broj kablovskih vodova
2. Rezistansa TS pogođene kvarom
3. Broj dionica aktivnog kablovskog voda
4. Specifična električna otpornost zemljišta
5. Tip kabla po broju žila
6. Materijal električne zaštite
- 7. Površina poprečnog presjeka električne zaštite**
8. Prisustvo armature kabla
9. Impedansa susjednih TS
10. Nulta komponenta struje kvara

Izaberite aktivni vod:

Unesite površinu provodnog dijela [mm^2]

Slika 73. Korisnički interfejs za KV-ove (prikaz polja za unos površine poprečnog presjeka provodnika koji ekvivalentira metalnu električnu zaštitu drugog KV-a)

Korisnički interfejs za NV    Korisnički interfejs za KV    Rezultat

- Kablovski vodovi

1. Broj kablovskih vodova
2. Rezistansa TS pogođene kvarom
3. Broj dionica aktivnog kablovskog voda
4. Specifična električna otpornost zemljišta
5. Tip kabla po broju žila
6. Materijal električne zaštite
- 7. Površina poprečnog presjeka električne zaštite**
- 8. Prisustvo armature kabla**
9. Impedansa susjednih TS
10. Nulta komponenta struje kvara

Izaberite aktivni vod:

Armatura postoji.  
 Armatura ne postoji.

Slika 74. Korisnički interfejs za KV-ove (prikaz mogućnosti odabira prisustva armature drugog KV-a)

U cilju posmatranja iznesenih napona (do više susjednih TS-a) za proizvoljno uklopljeno stanje i u cilju demonstriranja rada pomenutog GUI-a, posmatra se kvar ka zemlji – u VNRP-u. U njemu se nalazi pet vodova u pogonu (dva NV-a i tri KV-a), od kojih svaki napaja mjesto kvara. Na slici 75 su demonstrirani rezultati, putem GUI-a. Svaki navedeni vod daje određeni doprinos struji kvara. Za slučaj kablova, rezultat je izneseni napon poslednje susjedne TS-e. Sa grafika se mogu vidjeti efektivne vrijednosti iznesenih napona pet proizvoljno uzetih vodova sledećih karakteristika:

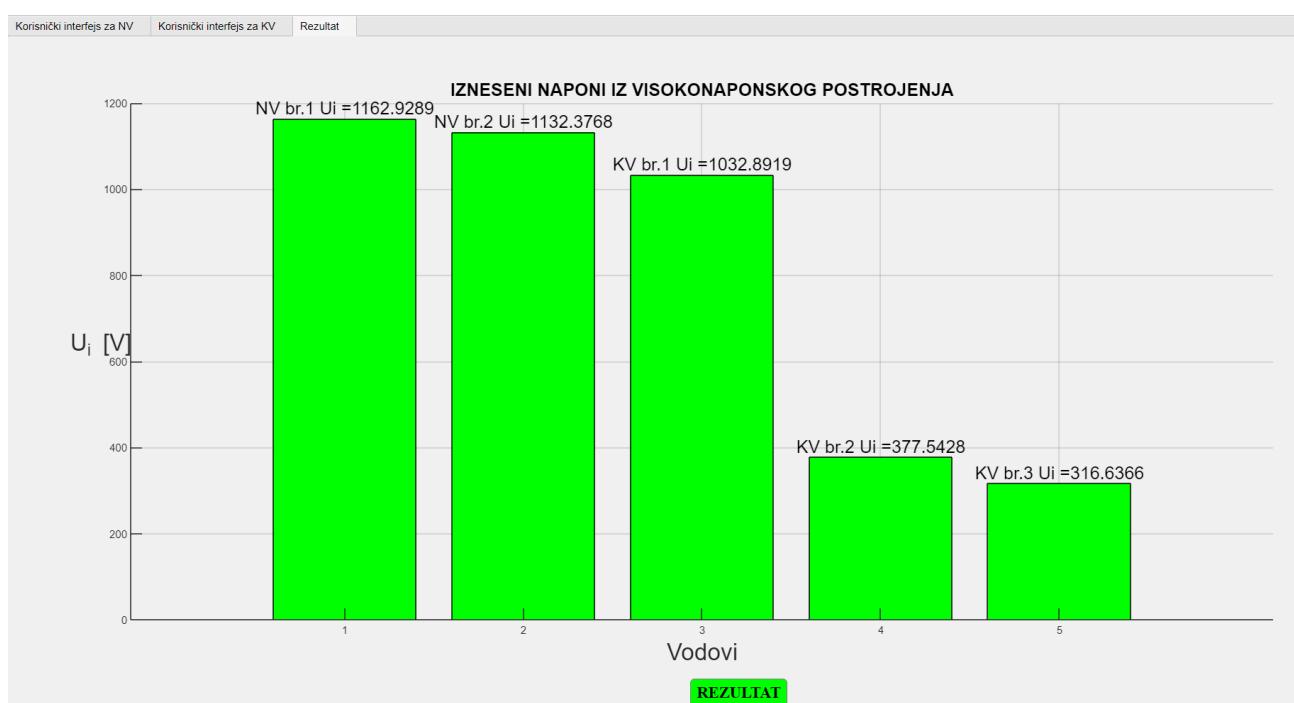
Prvi 35 kV NV: Aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $35 \text{ mm}^2$ , specifična otpornost zemljišta je  $100 \Omega * m$ , temperatura je  $25^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $10 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-a je  $2 \Omega$ , rezistansa TS-e pogođene kvarom je  $2 \Omega$ , broj raspona je 5 (dužine u [km]: 0.1; 0.15; 0.1; 0.05; 0.05), efektivna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $3500 A$ .

Drugi 110 kV NV: Aluminijumsko zaštitno uže, površina provodnog dijela presjeka užeta je  $50 \text{ mm}^2$ , specifična otpornost zemljišta je  $105 \Omega * m$ , temperatura je  $28^\circ\text{C}$ , otpornost stubova je  $12 \Omega$ , efektivna vrijednost impedanse susjedne TS-e je  $1 \Omega$ , broj raspona je 4 (dužine u [km]: 0.1; 0.2; 0.1; 0.03), efektivna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $6500 \text{ A}$ .

Prvi 10 kV KV: jednožilni - XHP 48/O-A  $3x1x95/16 \text{ mm}^2$  6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $16 \text{ mm}^2$ , specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , broj dionica je 3 (dužine u [km]: 0.2; 0.3; 0.3), efektivne vrijednosti impedansi susjednih TS-a su, respektivno:  $2 \Omega$ ;  $1 \Omega$ ;  $1.5 \Omega$ , efektivna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $1500 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je čelik.

Drugi 10 kV KV: trožilni - XHE 49/24  $3x120/16 \text{ mm}^2$  6/10/12 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $3x16 \text{ mm}^2$ , specifična električna otpornost tla je  $65 \Omega * m$ , broj dionica je 2 (dužine u [km]: 1; 1.1), efektivne vrijednosti impedansi susjednih TS-a su, respektivno:  $1 \Omega$ ;  $2 \Omega$ , efektivna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $2000 \text{ A}$ . Podaci o armaturi: materijal je aluminijum.

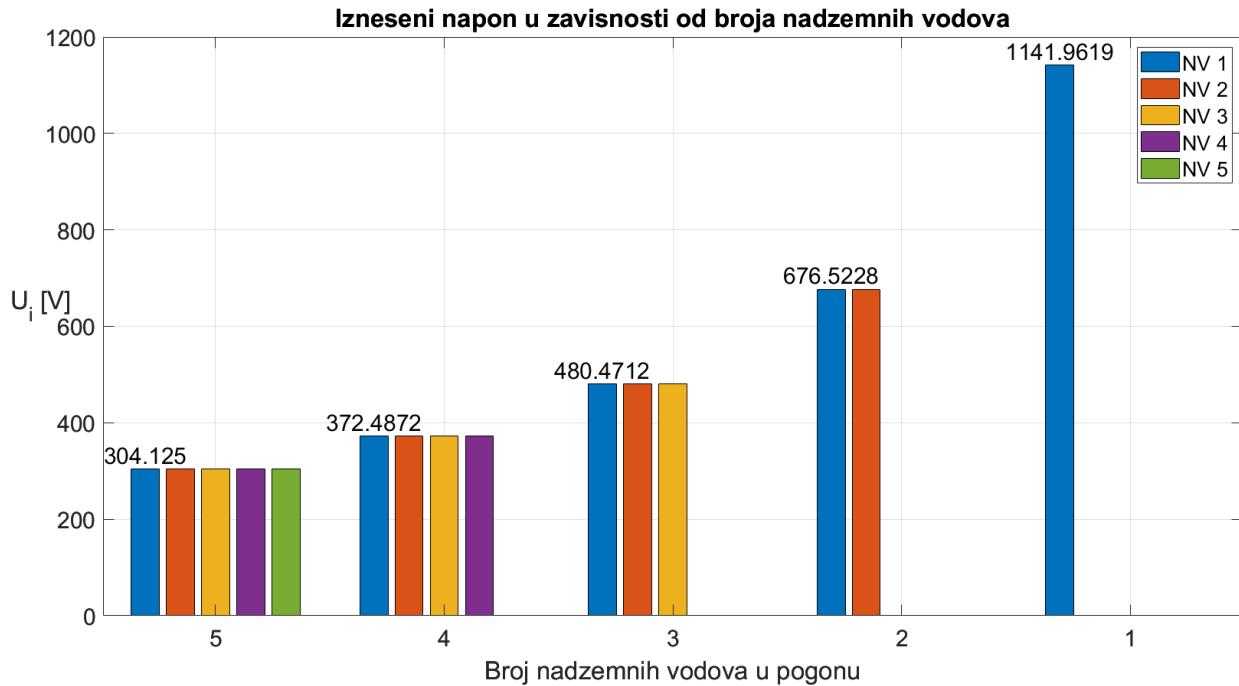
Treći 35 kV KV: jednožilni - XHP 48/36  $3x1x400/35 \text{ mm}^2$  20.8/36/42 kV. Metalni plašt je od bakra poprečnog presjeka  $35 \text{ mm}^2$ , specifična električna otpornost tla je  $60 \Omega * m$ , broj dionica je 4 (dužine u [km]: 1; 0.2; 0.5; 0.6), efektivne vrijednosti impedansi susjednih TS su, respektivno:  $1.5 \Omega$ ;  $1 \Omega$ ;  $2 \Omega$ ;  $1 \Omega$ , efektivna vrijednost nulte komponente struje kvara je  $4000 \text{ A}$ . Armatura nije prisutna.



Slika 75. Izneseni naponi iz VNRP-a (pogođenog kvarom) za slučaj dva NV-a i tri KV-a, pri čemu svaki vod napaja mjesto kvara

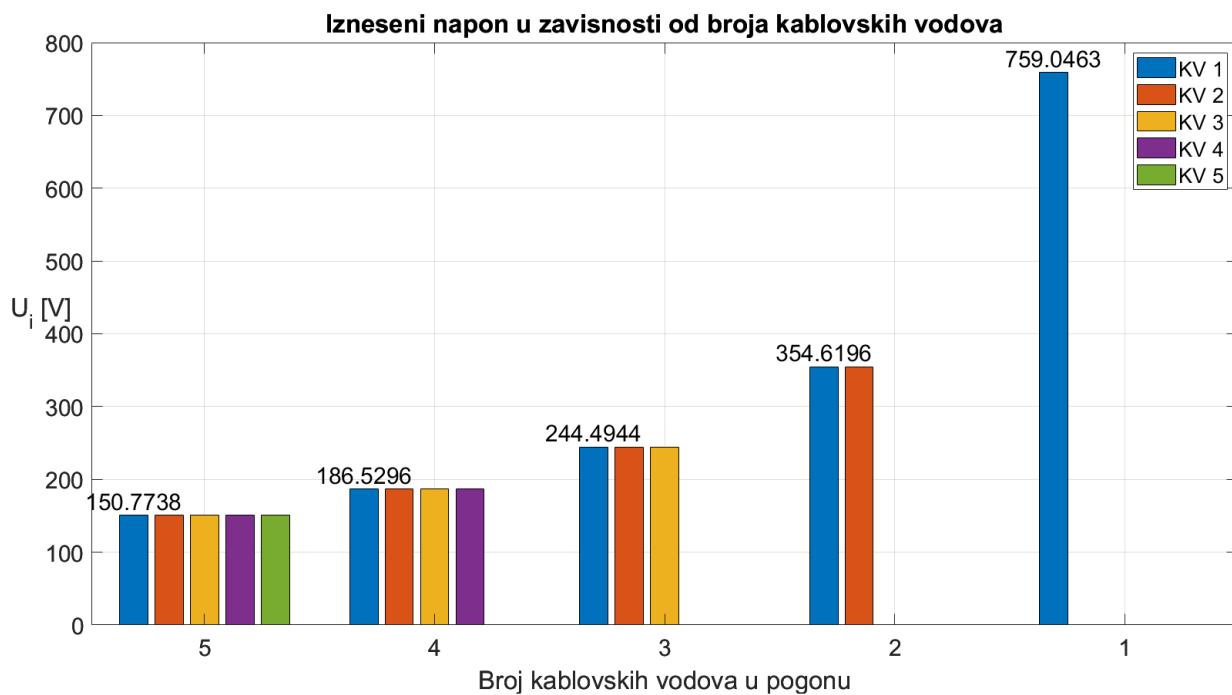
Na slici 76 prikazan je grafik efektivnih vrijednosti iznesenih napona u zavisnosti od ukupnog broja priključenih NV-ova. Mjesto kvara, u VNRP-u, napaja samo jedan NV. Proračun podrazumijeva da se, isključenjem NV-a, prekida galvanska veza sa njegovim zaštitnim užetom. Svih pet vodova su

identični drugom NV-u, korišćenom za proračun prikazan slikom 75. Uočava se da se izneseni naponi eksponencijalno smanjuju sa povećanjem priključenih NV-ova. Ovakva tendencija prisutna je, dominantno, zato što veći broj NV-ova smanjuje napon uzemljivača TS-e pogodene kvarom.



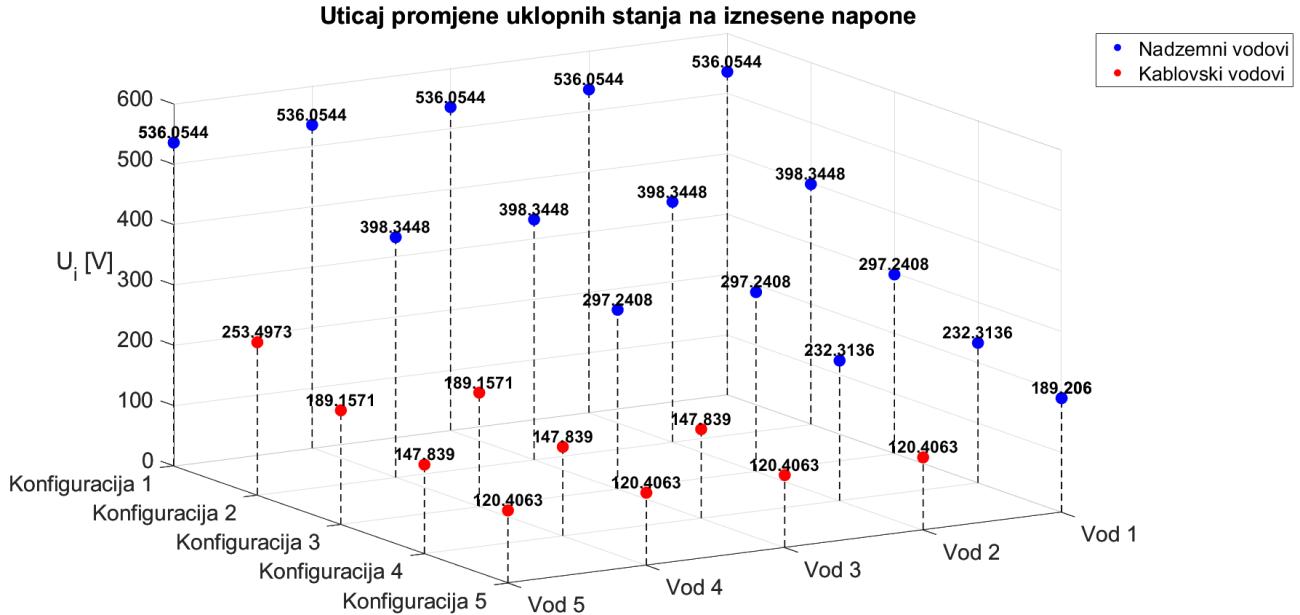
Slika 76. Izneseni naponi iz VNRP-a u zavisnosti od broja NV-ova u pogonu

Na slici 77 je prikazan grafik efektivnih vrijednosti iznesenih napona u zavisnosti od ukupnog broja priključenih KV-ova. Mjesto kvara, u VNRP-u, napaja samo jedan KV. Proračun podrazumijeva da se, isključenjem KV-a, prekida galvanska veza sa njegovom metalnom zaštitom. Svih pet vodova su identični trećem KV-u, korišćenom za proračun prikazan slikom 75. Uočava se da se izneseni naponi eksponencijalno smanjuju sa povećanjem priključenih KV-ova. Ovakva tendencija prisutna je, dominantno, zato što veći broj KV-ova smanjuje napon uzemljivača TS-e pogodene kvarom.



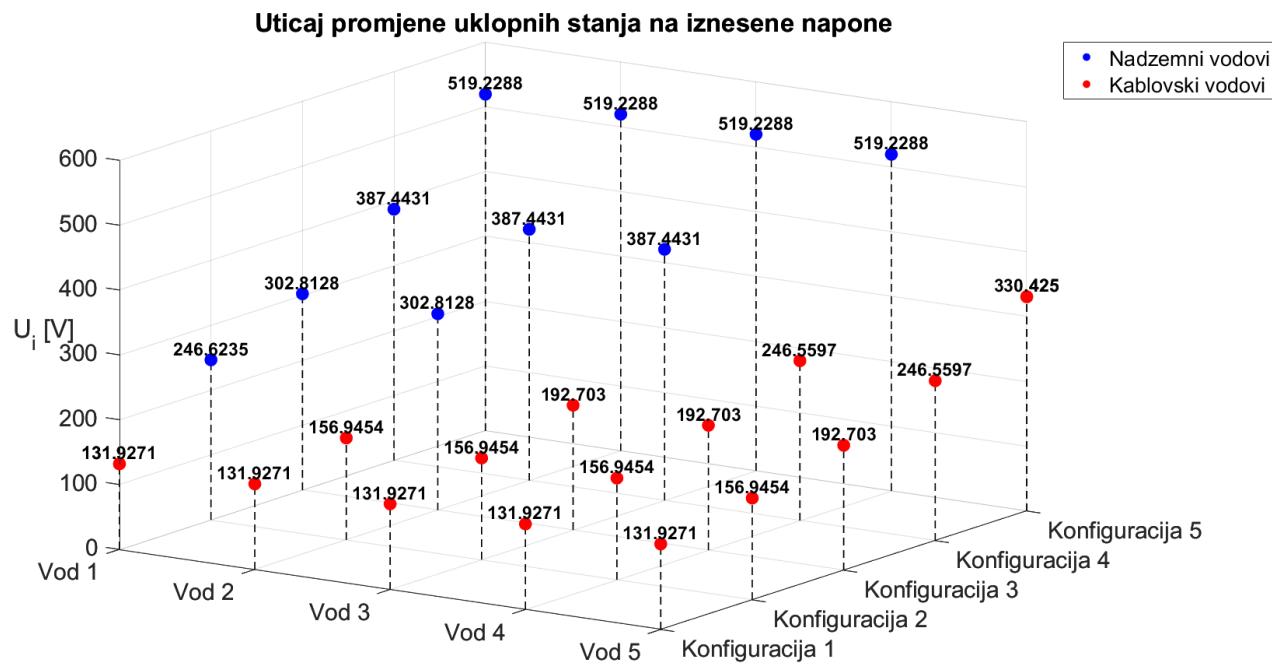
Slika 77. Izneseni naponi iz VNRP-a u zavisnosti od broja KV-a u pogonu

Na slici 78 je prikazana zavisnost efektivne vrijednosti iznesenih napona u zavisnosti od odnosa broja priključenih NV-ova i KV-ova. Kvar ka zemlji napaja samo jedan NV i njegova nulta komponenta struje kratkog spoja iznosi  $3500\text{ A}$ . Zaključuje se da zamjena NV-ova KV-ovima dovodi do smanjenja apsolutno svih iznesenih napona, sa parametrima koji su prethodno navedeni. Odnosno povećanjem broja KV-ova, izneseni naponi bivaju sve niži. Svaka iteracija proračuna odgovara istim uslovima kvara. Za prorčun je korišćen prvi NV i treći KV, iz proračuna vezanog za sliku 75 (sa izmjenom dužine NV-a, koja je ovdje  $2.3\text{ km}$  ( $0.5\text{ km}$ ;  $0.3\text{ km}$ ;  $0.5\text{ km}$ ;  $0.5\text{ km}$ ) i izmjenom efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara KV-a, koja je ovdje  $0\text{ A}$ ).



Slika 78. Izneseni naponi u zavisnosti od odnosa broja NV-ova i KV-ova (kvar napajan jednim NV-om)

Na slici 79 je prikazana zavisnost efektivne vrijednosti iznesenih napona u zavisnosti od odnosa broja priključenih NV-ova i KV-ova. Kvar ka zemlji napaja samo jedan KV i njegova nulta komponenta struje kratkog spoja iznosi  $3500\ A$ . Zaključuje se da, zamjena KV-ova NV-ovima, dovodi do povećanja apsolutno svih iznesenih napona, sa parametrima koji su prethodno navedeni. Odnosno povećanjem broja NV-ova, izneseni naponi bivaju sve viši. Svaka iteracija proračuna odgovara istim uslovima kvara. Za prorčun je korišćen drugi NV i treći KV, iz proračuna vezanog za sliku 75 (sa izmjenom dužine NV-a, koja je ovdje  $2.3\ km$  ( $0.5\ km$ ;  $0.3\ km$ ;  $0.5\ km$ ;  $0.5\ km$ ), efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara NV-a, koja je ovdje  $0\ A$  i izmjenom efektivne vrijednosti nulte komponente struje kvara KV-a, koja je ovdje  $3500\ A$ ).



Slika 79. Izneseni naponi u zavisnosti od odnosa broja NV-ova i KV-ova (kvar napajan jednim KV-om)

## 7. Zaključak

U radu je analiziran individualni i kombinovani uticaj različitih faktora na iznesene napone (odnosno iznesene potencijale, u odnosu na nulti referentni potencijal zemlje). Korišćen je matematički proračun za određivanje koeficijenata iznesenih potencijala NV-ova i KV-ova, njihovih redukcionih faktora, impedansi od interesa, zatim napona uzemljivača VNRP-a pogodjenog kvarom i na kraju samih iznesenih napona. Proračun je prilagođen proizvoljnom uklopnom stanju u VNRP-u, u kome se dešavaju kvarovi sa zemljom. Pomenuti program, koji je implementiran u MATLAB-u, prati GUI (razvijen u MATLAB-ovom App Designer-u). GUI omogućava korisnicima interakciju sa programom, s ciljem dobijanja vrijednosti iznesenih napona. Korisnik odabirom uticajnih parametara, može pratiti njihov uticaj na iznesene napone. Fokus istraživačkog rada je orijentisan na analizu prirode i kvantiteta uticaja određenih faktora, samostalno ili u kombinaciji sa drugim faktorima, na iznesene napone. U radu se jedan dio istraživanja odnosi na uticaje određenih faktora na koeficijente iznesenih potencijala i redukcione faktore, s ciljem boljeg razumijevanja ponašanja iznesenih napona.

Stanje kvara u VNRP-u, koje izaziva izlazak iz normalnog sigurnog režima rada, u velikom broju slučajeva je opasno po osoblje koje se nalazi unutar tog postrojenja i/ili njegove okoline. Pored tog problema, mogu se pojaviti izneseni naponi do jednog i/ili više susjednih postrojenja. Izneseni naponi su opasni po osoblje unutar susjednih postrojenja i/ili njihove okoline ukoliko izazivaju nedozvoljene vrijednosti napona dodira i koraka. Analiza uticajnih faktora, koja je u radu sprovedena, podrazumijeva praćenje efektivnih vrijednosti iznesenih napona za istovremene varijacije dva uticajna faktora, ili za varijacije jednog od njih. Pri pomenutoj analizi došlo se do sledećih zaključaka:

Proračuni, sprovedeni za NV-ove, su pokazali da na izneseni napon izražen uticaj ima broj raspona NV-a, njihova dužina i naponski nivo. Nakon određene dužine, bez obzira na materijal zaštitnog užeta, izneseni naponi su zanemarljivo niski. Za kraće dužine NV-ova (čija tačna vrijednost zavisi od parametara voda i sredine) je najnepovoljnije čelično zaštitno uže. Ukoliko je impedansa uzemljenja susjedne TS-e izuzetno velika, izneseni naponi, u danima sa visokim temperaturama, mogu biti značajno niži u odnosu na zimske dane, kada su temperature izrazito niske. Pokazuje se da promjena specifične električne otpornosti tla ima umjeren uticaj na izneseni napon. Kada je nulta komponenta struje kvara velika, tada vrijednosti broja raspona i rezistanse uzemljivača TS-e pogodjene kvarom značajno utiču na vrijednosti iznesenih napona (u suprotnom je taj uticaj manji). Nulta komponenta struje kvara gubi uticaj na iznesene napone u slučaju kada je NV izrazito velike dužine. Izneseni naponi rastu sa povećanjem impedanse susjedne TS-e i impedanse TS-e pogodjene kvarom. U zavisnosti od vrijednosti jedne od njih, a pri povećanju druge, izneseni naponi rastu od blago linearno do kvadratno. Kod kaskadne veze TS-a srednji na niski napon, koje su povezane KV-om, izneseni napon eksponencijalno opada sa udaljavanjem od mjesta kvara. Proračuni, sprovedeni za KV-ove, pokazuju da se kod prve susjedne TS-e, dešava sledeće: sa porastom njihovog broja iznad određene vrijednosti, izneseni napon blago raste (iako je do tada eksponencijalno opadao). Kod poslednje susjedne TS-e, sa porastom broja dionica, izneseni napon eksponencijalno opada. Kod dužih dionica, izneseni napon prve susjedne TS-e je viši, negoli kada su dionice kraće. Za izneseni napon poslednje susjedne TS-e, situacija je obrnuta. Jednožilni kabl iznosi više napone, u odnosu na trožilni (izuzetak su dugi KV-ovi ili oni sa velikim brojem dionica). Ukoliko je broj dionica kabla mali (na pr. jedna, dvije), tada prisustvo armature smanjuje iznesene napone. Kada KV ima veći broj dionica, armatura uvećava iznesene napone. Armatura ima veći uticaj kod jednožilnog KV-a, negoli kod

trožilnog. U pogledu iznesenih napona, najnepovoljniji materijal metalnog plašta je olovo, zatim slijedi aluminijum i na kraju bakar. Povećanje nulte komponente struje kvara čini iznesene napone višim i osjetljivijim na promjene drugih uticajnih parametara. Prisustvo armature čini iznesene napone osjetljivijim na promjene impedanse TS-e pogodene kvarom (čije uvećanje povećava iznesene napone). Nulta komponenta struje kvara drastično utiče na iznesene napone kada je armatura od čelika, za razliku od slučaja kada je armatura aluminijumska. Korak uvijanja armaturne trake je poželjno da bude niži od  $25\text{ mm}$  (odnosno što niži, kako bi se dobili minimalni izneseni naponi). Maksimalna vrijednost iznesenog napona ima se kada je korak uvijanja trake oko  $25\text{ mm}$ . Daljim povećanjem vrijednosti koraka uvijanja armaturne trake, izneseni naponi će se blago smanjivati, ali neće dostići minimalnu vrijednost. Poželjno je da traka ima što veću deblinu i širinu. Ukoliko su impedanse susjednih TS-a visoke, tada je značajniji uticaj armature. Zaključak je da se, isključenjem vodova, povećavaju naponi koji se iznose preostalim priključenim vodovima (odnosno isključenjem zaštitnih užadi NV-ova i/ili isključenjem metalnih zaštita KV-ova). U pogledu konfiguracije mreže, zaključuje se da su izneseni naponi uobičajeno veći kada preovladava vazdušna mreža, negoli kada je zastupljenija kablovска. Ovaj zaključak je relativan, iz razloga što izneseni naponi zavise od velikog broja faktora, čije ga ekstremne modifikacije mogu promijeniti. Izvedeni zaključci se, korišćenjem istog programa, mogu proširiti drugim željenim kombinacijama uticajnih faktora, a zatim očitavanjem efektivnih vrijednosti iznesenih napona. Posmatranjem prethodnih grafika moguće je zaključiti kako optimalno birati pojedine parametre vodova i okoline, s ciljem smanjenja iznesenih napona. Provjera svake kombinacije uticajnih parametara, za željeno uklopno stanje, je moguća kroz GUI (koji počiva na MATLAB-ovom programu).

U daljim istraživanjima je moguće proračun učiniti preciznijim time što bi se razmotrile i korigovale sledeće aproksimacije: izjednačavanje impedansi uzemljenja kaskadno vezanih TS-a u slučaju proračuna za KV-ove, izjednačavanje redne impedanse kablovskih dionica i zanemarivanje rezistanse zemlje između uzemljivača svaka dva stuba NV-a. U praksi zemljiste nije homogena materija, te se, shodno tome, može koristiti model višeslojnog tla. Time bi se vjerodostojnije uvažile stvarne karakteristike tla i proračun učinio preciznijim. Program, koji je u pozadini ovog rada, bi uz kombinaciju sa optimizacionim algoritmima mogao da ponudi optimalne vrijednosti uticajnih parametara, uz uvažavanje njihovih teorijskih i praktičnih ograničenja i uz kriterijumsku funkciju minimizacije iznesenih napona. Pored pomenutog, izlaz pomenutog programa bi mogla biti optimalna konfiguracija priključene mreže u VNRP-u, uz kriterijumsku funkciju minimizacije iznesenih napona.

## Literatura

- [1] Jovanović, S. Milan, "Električne instalacije", Elektrotehnički fakultet, 1983, Beograd.
- [2] Škuletić, Sreten, Kaljević, Nikolija, "Visokonaponska razvodna postrojenja", Zavod za udžbenike i nastavna sredstva, 2019, Podgorica.
- [3] Požar, Hrvoje, "Visokonaponska rasklopna postrojenja", Tehnička knjiga, 1978, Zagreb.
- [4] Vučevac, Ivana, "Uzemljivači", Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacionih tehnologija Univerziteta Josipa Jurja Strossmayera, 2016, Osijek.
- [5] Đurić, Milenko, "Visokonaponska postrojenja", Beopres, 2009, Beograd.
- [6] Meliopoulos, A. P. Sakis, "Power System Grounding and Transients", Marcel Dekker, 1988, New York.
- [7] Ćalović, S. Milan, Sarić, T. Andrija, "Eksploracija elektroenergetskih sistema", Beopres, 1999, Beograd.
- [8] Božuta, Franjo, "Automatski zaštitni uređaji elektroenergetskih postrojenja", Svjetlost, 1987, Sarajevo.
- [9] Krneta, Đurađ, "Izbor uzemljenja mreže", Zbornik radova Fakulteta tehničkih nauka u Novom Sadu, Novembar 2022, Novi Sad.
- [10] Strezoski, V, "Osnovi elektroenergetike", Fakultet tehničkih nauka, 2014, Novi Sad.
- [11] Dotlić, G, "Elektroenergetika kroz standard, zakone, pravilnike odluke i tehničke preporuke", Savez mašinskih i elektrotehničkih inženjera Srbije, 2013, Beograd.
- [12] "Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V", Sl. List SRJ, br. 61/95.
- [13] Jecmenica, M. Miloš, Trifunovic, Jovan, Kostic, Miomir, "Poređenje mogućnosti konvencionalne metodologije i softvera CYMGRD pri projektovanju uzemljivača tipične distributivne transformatorske stanice", Tehnika 65(1):89-96, DOI: 10.5937/tehnika1601089J, Januar 2016.
- [14] "Edukativni softver za dimenzionisanje uzemljivača elektroenergetskih postrojenja na abazi metode konačnih elemenata", 18th International Symposium INFOTEH-JAHORINA, Mart 2019.
- [15] Mijatović, B, Zeljković, Č, "Computer-Assisted Performance Assessment of Outdoor Substation Grounding Systems", in X International Symposium on Industrial Electronics INDEL 2014, Banja Luka, 2014.
- [16] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," in IEEE Std 80-2000 , vol. no. pp.1-192, Avgust 2000.
- [17] He, J, Zang, R, Zhang, B, "Methodology and Technology for Power System Grounding", 2012, Singapore: Wiley.
- [18] Gregić, Marin, "Uzemljivači", Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacionih tehnologija Univerziteta Josipa Jurja Strossmayera, 2019, Osijek.
- [19] Majdandžić, Franjo, "Uzemljivači i sustavi uzemljenja", Graphis, 2004, Zagreb.
- [20] Padelin, Mario, "Zaštita od gromova", Školska knjiga, 1987, Zagreb.
- [21] Haurdić, Benjamin, "Tretman i uzemljenje neutralne tačke niskonaponskih vodova", Tehnički fakultet u Bihaću, 12th International Scientific Conference on Production Engineering: development and modernization of production, 2019, Rim.

- [22] Uglešić, I, "Tehnika visokog napona", 2002, Zagreb.
- [23] Milanković, Lj, "Tehnika visokog napona", Naučna knjiga, 1987, Beograd.
- [24] Čalović, S. Milan, "Regulacija elektroenergetskih sistema", ETF, 1997, Beograd.
- [25] Jozsa, Lajos, Fekete, Kresimir, Glavaš, Hrvoje, "Kratki spojevi u elektroenergetskim mrežama", Graphis, 2022, Zagreb.
- [26] Nahman, M. Jovan, "Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža", Naučna knjiga, 1980, Beograd.
- [27] Ravlić, Sonja, "Prepoznavanje visokoomskih kvarova u mrežama srednjega napona uzemljenima preko transformatora za uzemljenje zvjezdista", Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2016, Zagreb.
- [28] Kuric, Dominik, "Analiza uzemljivačkog sustava visokonaponskog postrojenja", Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacionih tehnologija Univerziteta Josipa Jurja Strossmayera, 2021, Osijek.
- [29] S. Tatalović, D. Salamon, "Problematika uzemljenja TS 110/x kV u specifičnim uslovima rada i nedostatka prostora", Infoteh-Jahorina, vol. 13, Mart 2014.
- [30] Bijelić, Davor, "Uzemljenje ograde elektroenergetskog postrojenja", Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Univerziteta Josipa Jurja Strossmayera, Osijek, 2018.
- [31] Agudelo, Laura, Ortiz, Ramon Hector, Montoya Monica, Zapata, Will Henry, Cardenas, Carlos, Echeverri, Juan Carlos and Moreno, German, "Transferred voltages in multigrounded systems", 2008 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America, Bogota, Colombia, avgust, 2008, 1-5.
- [32] Faleiro, E, Pazos, F.J, Asensio, G, Denche, G, García, D, Moreno, J, "Interaction between interconnected and isolated grounding systems: A case study of transferred potentials", IEEE Transactions on Power Delivery, DOI: 10.1109/TPWRD.2014.2379434.
- [33] Stanišić Stevan, Radaković Zoran, "Calculation of Touch Voltage Based on Physical Distribution of Earth Fault Current", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32 (Issue 5), 2246 - 2254, 2017.
- [34] Amadi, Hachimenum Nyebuchi, "Design of grounding system for A.C. substations with criticaal consideration of the mesh, touch and step potentials", European Journal of Engineering and Technology, Vol. 5 (Issue 4), 44 - 57, 2017.
- [35] Stanišić, Stevan, Radaković, Zoran, "Primena modernih FEM softvera za određivanje otpora uzemljenja, napona dodira i napona koraka", CIRED, Septembar 2016, Vrnjačka Banja.
- [36] Stanišić Stevan, Radaković Zoran, "Calculation of Touch Voltage Based on Physical Distribution of Earth Fault Current", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 32 (Issue 5), 2246 - 2254, 2017.
- [37] Dladla, M. N. Vuyani, Nnachi, F. Agha, Tshubwana, P. Rembuluwani, "The Impact of Different Fault Types on Touch Voltage, Step Voltage, and Ground Potential Rise", SAUPEC Conference, Durban, South Africa, Januar 25-27, 2022.
- [38] Lewis, David, "Introduction to Grounding Analysis", EasyPower LLC, April 2022, Portland.
- [39] Papić, Nenad, "Forenzika nesreća na radu uzrokovanih strujnim udarom", Sigurnost 61 (4) 395 - 400, Decembar 2019.
- [40] Ćosić, P. V, "Urgentna stanja u internoj medicine", Naučna knjiga, 1987, Beograd, str. 227-229.

- [41] Almusawi, Yasir Khaleel, Al-Sammarraie, Maha Raad Hashim, Shikara, Mukaram D, "The Effect of An Electric Current on Human Body The Effect of An Electric Current on Human Body", Medical Lab. Techniques Department, Al-Esraa University College, Septembar 2023, Baghdad.
- [42] Nizomova, Shaxnoza Q, "The effect of electric current on the human body", European International Journal of Multidisciplinary Research and Management Studies, 02(10):252-255, DOI: 10.55640/eijmrms-02-10-46, Oktobar 2022.
- [43] Pritchard, Geoffrey, "A new model for human body impedance", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume: 37, Issue: 2, DOI: 10.1109/TPWRD.2021.3074587, 955 – 959, April 2022.
- [44] Ferris, L. P, King, B. G, Spence, P.W, Williams H.B, "Effects of electric shock on the heart", Electrical engineering 55 (1936) 498–503.
- [45] Eagle, Ruth, "How various levels of electric shocks affect the body and how to recover", Medical News Today, Januar 2024.
- [46] Cadick, John, Capelli-Schellpfeffer, Mary, Neitzel, Dennis, "Electrical Safety Handbook 3E", McGraw-Hill Professional, ISBN 13: 9780071457729, 2005.
- [47] Hintz, Helmut, "Protection against electric shock", INTELEC - International Telecommunications Energy Conference, DOI: 10.1109/INTLEC.2005.335176, Oktobar 2005.
- [48] Dalziel, Charles F, "Effects electric shock on man", University of California, Berkeley, California, 1956.
- [49] "Pravilnik o opštim mjerama zaštite na radu od opasnog dejstva električne struje u objektima namenjenim za rad, radnim prostorijama i na radilištima", Sl. glasnik SRS, br. 21/89.
- [50] "Pravilnik o zaštitnim mjerama protiv opasnosti od električne struje u radnim prostorijama i na radilištima", Sl. list RCG br. 6/86, 16/86.
- [51] Savić, Milan, Stojković, Zlatan, "Tehnika visokog napona - atmosferski prenaponi", Elektrotehnički fakultet, Beograd, 2001.
- [52] Milojković, Slobodan, "Teorija električnih kola", drugo izdanje, Svjetlost OOUR, Sarajevo, 1987.
- [53] ELKA, "Medium voltage power cables with XLPE insulation for rated voltage up to 36 kV", Zagreb.