

Analiza uzemljenja stupova dalekovoda

Janković, Ante

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:974150>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom](#).

Download date / Datum preuzimanja: **2024-11-19**

Repository / Repozitorij:

[Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek](#)



**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I
INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA OSIJEK**

Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika

ANALIZA UZEMLJENJA STUPOVA DALEKOVODA

Diplomski rad

Ante Janković

Osijek, 2024.

Obrazac D1: Obrazac za ocjenu diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ocjena diplomskog rada na sveučilišnom diplomskom studiju

Ime i prezime pristupnika:	Ante Janković
Studij, smjer:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. pristupnika, god.	D-1449, 07.10.2022.
JMBAG:	0165082979
Mentor:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Sumentor:	
Sumentor iz tvrtke:	
Predsjednik Povjerenstva:	izv. prof. dr. sc. Danijel Topić
Član Povjerenstva 1:	izv. prof. dr. sc. Goran Knežević
Član Povjerenstva 2:	Nemanja Mišljenović, univ. mag. ing. el.
Naslov diplomskog rada:	Analiza uzemljenja stupova dalekovoda
Znanstvena grana diplomskog rada:	Elektroenergetika (zn. polje elektrotehnika)
Zadatak diplomskog rada:	U diplomskom radu potrebno je dati pregled konstrukcija sustava uzemljenja koji se koriste za različite konfiguracije visokonaponskih stupova dalekovoda. U računalnom programu potrebno je izraditi model za izračunavanje otpora uzemljenja različitih konfiguracija stupova dalekovoda. Dobivene rezultate potrebno je usporediti s rezultatima dobivenim mjerenjem. Tema rezervirana za studenta: Ante Janković
Datum ocjene pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	05.07.2024.
Ocjena pismenog dijela diplomskog rada od strane mentora:	Izvrstan (5)
Datum obrane diplomskog rada:	12.7.2024.
Ocjena usmenog dijela diplomskog rada (obrane):	Izvrstan (5)
Ukupna ocjena diplomskog rada:	Izvrstan (5)
Datum potvrde mentora o predaji konačne verzije diplomskog rada čime je pristupnik završio sveučilišni diplomski studij:	12.07.2024.



FERIT

FAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA
I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA **OSIJEK**

IZJAVA O IZVORNOSTI RADA

Osijek, 12.07.2024.

Ime i prezime Pristupnika:	Ante Janković
Studij:	Sveučilišni diplomski studij Elektrotehnika, Elektroenergetika
Mat. br. Pristupnika, godina upisa:	D-1449, 07.10.2022.
Turnitin podudaranje [%]:	12

Ovom izjavom izjavljujem da je rad pod nazivom: **Analiza uzemljenja stupova dalekovoda**

izrađen pod vodstvom mentora izv. prof. dr. sc. Goran Knežević

i sumentora

moj vlastiti rad i prema mom najboljem znanju ne sadrži prethodno objavljene ili neobjavljene pisane materijale drugih osoba, osim onih koji su izričito priznati navođenjem literature i drugih izvora informacija.

Izjavljujem da je intelektualni sadržaj navedenog rada proizvod mog vlastitog rada, osim u onom dijelu za koji mi je bila potrebna pomoć mentora, sumentora i drugih osoba, a što je izričito navedeno u radu.

Potpis pristupnika:

SADRŽAJ

1. UVOD	1
1.1. Zadatak diplomskog rada	1
2. PREGLED PODRUČJA TEME	2
3. NADZEMNI VOD	4
3.1. Vodiči	4
3.2. Izolatori	5
3.3. Stupovi	8
3.4. Spojni, ovesjni i zaštitni pribor	9
3.5. Uzemljenje i zaštitna užad	10
4. NAPON DODIRA I NAPON KORAKA	12
4.1. Napon dodira	13
4.2. Napon koraka	13
5. MJERENJE OTPORA RASPROSTIRANJA, NAPONA DODIRA I MJERENJE RASPODJELE POTENCIJALA	14
5.1. Opis mjernih postupaka	15
5.1.1. Mjerenje otpora uzemljenja i raspodjele potencijala U-I metodom	15
5.1.2. Mjerenje napona dodira U-I metodom	16
5.2. Mjerenje raspodjele potencijala	17
5.3. Mjerenje napona dodira	20
5.4. Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa bez spoja sa zaštitnim užetom	21
6. REZULTATI I SIMULACIJA	23
6.1. Opis modela	23
6.2. Model s jednim prstenastim uzemljivačem	24
6.3. Model uzemljivača s dva koncentrična prstena	31
7. USPOREDBA IZMJERENIH VRIJEDNOSTI I ONIH DOBIVENIH ANALIZOM MODELA	38
ZAKLJUČAK	39
LITERATURA	41

SAŽETAK.....	44
ABSTRACT	44
ŽIVOTOPIS.....	45

1. UVOD

S napretkom znanosti i tehnologije i razvojem gospodarstva, složenost elektroenergetskog sustava raste, a s njime i vrijednost struje kvara. Razumna udaljenost stupova i pouzdani sustavi uzemljenja ključni su za rješavanje problema povećanja nazivnog napona dalekovoda koji nosi veći rizik od struje uzemljenja. Sustavi uzemljenja dalekovoda imaju ključnu ulogu u osiguranju sigurnog i pouzdanog funkcioniranja elektroenergetskog sustava, stoga je od vitalne važnosti osigurati da su ovi sustavi pravilno dizajnirani i da mogu trajati kroz cijeli radni vijek dalekovoda. Kvalitetni sustavi uzemljenja stupova dalekovoda ključni su kako bi se osiguralo sigurno rasprostiranje struje munje i struje kvara u zemlju. Kad dođe do jednofaznog kratkog spoja na dalekovodu, struja kvara teče stupom dalekovoda u uzemljivač stupa dalekovoda, što povećava potencijal uzemljivača te napon koraka i dodira oko stupa, što može ugroziti sigurnost ljudi i životinja. Stoga je važno dimenzionirati uzemljivač stupa dalekovoda te voditi računa o oblikovanju potencijala zemljišta kako bi naponi dodira i koraka bili unutar dopuštenih granica.

1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je dati pregled konstrukcija sustava uzemljenja koji se koriste za različite konfiguracije visokonaponskih stupova dalekovoda. U računalnom programu potrebno je izraditi model za izračunavanje otpora uzemljenja različitih konfiguracija stupova dalekovoda. Dobivene rezultate potrebno je usporediti s rezultatima dobivenim mjerenjem.

2. PREGLED PODRUČJA TEME

Autor F. Majdandžić u literaturi [1] definira pojmove uzemljivača i sustava uzemljenja. Detaljno opisuje sve vrste uzemljenja prema namjeni te daje teorijsku podlogu i pojednostavljeni izračun otpora uzemljenja. U literaturi [2] općenito se govori o uzemljenju u rasklopnom postrojenju, određivanju otpora uzemljenja i potencijala na površini zemlje te o izvedbi uzemljivača i vodova za uzemljenje.

U radovima [3-9] autori su izložili osnovne teorije o uzemljivačima, proračunima otpora rasprostiranja, napona koraka i napona dodira te su se analizirale metode za mjerenje otpora rasprostiranja uzemljenja.

Autorima znanstvenog rada [10] cilj je istražiti adekvatno modeliranje tla koje je ključno za procjenu impedancije uzemljenja sustava uzemljenja i tranzijentnih pojava u elektroenergetskim sustavima. U radu se analiziraju tri modela tla s električnim parametrima koji variraju s frekvencijom i sadržajem vode, a to su Smith-Longmire, Scott i Messier modeli, te njihov utjecaj na valne oblike porasta potencijala tla vertikalnih uzemljivačkih šipki. U znanstvenom radu [11] autori istražuju učinak strukture tla uzemljenja podstanica na prekidače. Kao računalno rješenje Maxwelllove jednadžbe koristi se metoda momenta. Razmatraju se dvije vrste struktura tla: jednoliko tlo i tlo s višestrukoum strukturom.

Kako bi se zadovoljili sigurnosni standardi, otpor uzemljenja sustava mora biti dovoljno nizak što je posebno teško postići u problematičnim područjima, stoga otpor uzemljenja treba procijeniti u ranoj fazi projektiranja. Postoje formule i modeli za teoretski izračun otpora uzemljenja raznih vrsta sustava uzemljenja. U znanstvenom radu [12] autori predlažu metodu za generiranje približnih formula koje su namijenjene za brzi proračun otpora uzemljenja koji se mogu primijeniti na bilo koju vrstu složenih uzemljivača. Trenutne metode za mjerenje otpora uzemljenja imaju mnoga ograničenja, nedefinirani ukopani položaji za uzemljenje, neučinkovitost jer bi uzemljenje trebalo biti odspojeno i niska točnost mjerenja. Stoga autori znanstvenog rada [13] predlažu metodu mjerenja otpora uzemljenja ubrizgavanjem višefrekventne struje. Znanstveni rad [14] proučava kako povećanje vanjskog radijusa i dubine temelja utječu na smanjenje otpora uzemljivača. Razlozi za veliki otpor uzemljenja dalekovoda mogu biti konstrukcijski ali i prirodni poput sastava tla, vlage i klime. Kako bi se otpor uzemljenja smanjio autori znanstvenog rada [15] predlažu sljedeće mjere: horizontalno produljivanje uzemljenja, duboko ukopano uzemljenje, korištenje posebnih materijala za smanjenje otpora kao što su: zatrpavanje, korištenje elektrolitske elektrode za uzemljivanje, korištenje otvorenog uzemljivača tipa WJ. Prilikom dizajniranja sustava uzemljenja potrebno

je u obzir uzeti prostorne i vremenske varijacije impedancije temelja stupa međutim u fazi projektiranja uzimaju se samo prostorne varijacije. U znanstvenom radu [16] autori istražuju kroz terenska mjerenja tijekom cijele godine kako vremenske varijacije utječu na impedanciju uzemljivačkog sustava.

3. NADZEMNI VOD

Nadzemni vod ili dalekovod je prema literaturi [17] „nadzemni električni energetska vod izmjenične ili istosmjernje električne struje visokog električnog napona koji služi za prijenos električne energije, bilo velikih snaga, bilo na velike udaljenosti, ili oboje.“

Velika prednost nadzemnih vodova u usporedbi s kabelima je vrijeme trajanja popravka. Popravak nadzemnog voda traje u prosjeku jedan dan dok kod kabela popravci traju 3 ili više dana ovisno o vrsti kabela [19].

Osnovni dijelovi dalekovoda su :

- vodiči,
- izolatori,
- stupovi,
- spojni, ovjesni i zaštitni pribor,
- uzemljenje i zaštitna užad.

Dalekovodi se mogu podijeliti prema nazivnom naponu, broju strujnih krugova, materijalu i konstrukciji vodiča te materijalu i konstrukciji stupova.

- Prijenosni sustav Republike Hrvatske ima tri naponske razine 400, 220 i 110 kV [18].
- Prema broju strujnih krugova dalekovod može biti jednostruki ili dvostruki.
- Za izradu vodiča nadzemnih vodova koristi se alučel- vodič s jezgrom čelične žice ili užeta i perifernim žicama od aluminijske. Čelik preuzima mehanička opterećenja, a aluminij ima ulogu vodiča.
- Za izradu stupova dalekovoda koristi se čelik rešetkaste konstrukcije.

3.1. Vodiči

Vodiči služe za vođenje električne struje i to ih čini najvažnijim dijelom dalekovoda. Vodiči su ovješeni na stupove pomoću izolatora. S obzirom da su vodiči pod visokim naponom prema zemlji potrebno je osigurati dovoljnu visinu kako bi bili izvan dohvata ljudi i vozila. Dimenzioniranje vodiča vrši se s obzirom na električne i mehaničke zahtjeve, električno dimenzioniranje se vrši prema struji koja teče kroz vodič i njihovom naponu, a mehaničko radi utvrđivanja mehaničkog naprezanja vodiča i njegovog provjesa. Vodiči se izrađuju od materijala koji imaju dobru električnu vodljivost i zadovoljavajuću mehaničku čvrstoću. Bakar

zadovoljava oba uvjeta, ali zbog njegove visoke cijene ne upotrebljava se na dalekovodima. Aluminij ima nižu električnu vodljivost od bakra, ali je jeftiniji i znatno lakši. Zbog premale mehaničke čvrstoće aluminij se ne upotrebljava sam, nego u kombinaciji s čelikom kako bi mu se povećala mehanička čvrstoća.



Slika 3.1. Alučel vodič

3.2. Izolatori

Izolator nadzemnih vodova je zrak, ali na mjestima gdje je vodič ovješeno o stup nužno ga je električki odvojiti, odnosno izolirati. Osim električnog odvajanja izolatori imaju važnu mehaničku ulogu, težinu vodiča i dodatnog tereta (led, vjetar) s vodiča prenose na stup.

Izolatori prema namjeni mogu biti potporni, provodni ovjesni.

Vrste materijala za izradu izolatora:

- porculan,
- steatit,
- staklo.

Porculan je prvi keramički proizvod koji se upotrijebio kao izolacijski materijal za učvršćivanje vodiča nadzemnih vodova. Odlikuju ga dobra izolacijska svojstva i velika otpornost prema djelovanju atmosferskih i klimatskih utjecaja. Njegova svojstva su se nastojala usavršiti pa su

nastale posebne vrste porculana za elektrotehniku. Nedostatak porculana je što za vrijeme pečenja dolazi do velikih kontrakcija volumena. To uvelike otežava proizvodnju proizvoda standardnih dimenzija. Od elektroporculana proizvode se niskonaponski i visokonaponski provodni i potporni izolatori.



Slika 3.2. Porculanski provodni izolator na transformatoru

Steatit ima pretežno kristalnu strukturu koja uvjetuje bolja električna, toplinska i mehanička svojstva. U usporedbi s porculanom ima manje kontrakcije volumena pri pečenju što znatno pojednostavljuje proizvodnju. Glavni nedostatak steatita kao izolacijskog materijala u odnosu na porculan je veliki koeficijent toplinskog rastezanja.



Slika 3.3. Izolator od steatita

Staklo ima jako dobra izolacijska svojstva na niskim temperaturama, dok s porastom temperature specifični električni otpor opada. Na temperaturama između 200°C i 300°C stakla gube svoja izolacijska svojstva. Također, s napredovanjem korozije pod utjecajem vlage specifični električni otpor stakla opada, tada na površini stakla nastaje vodljivi sloj.



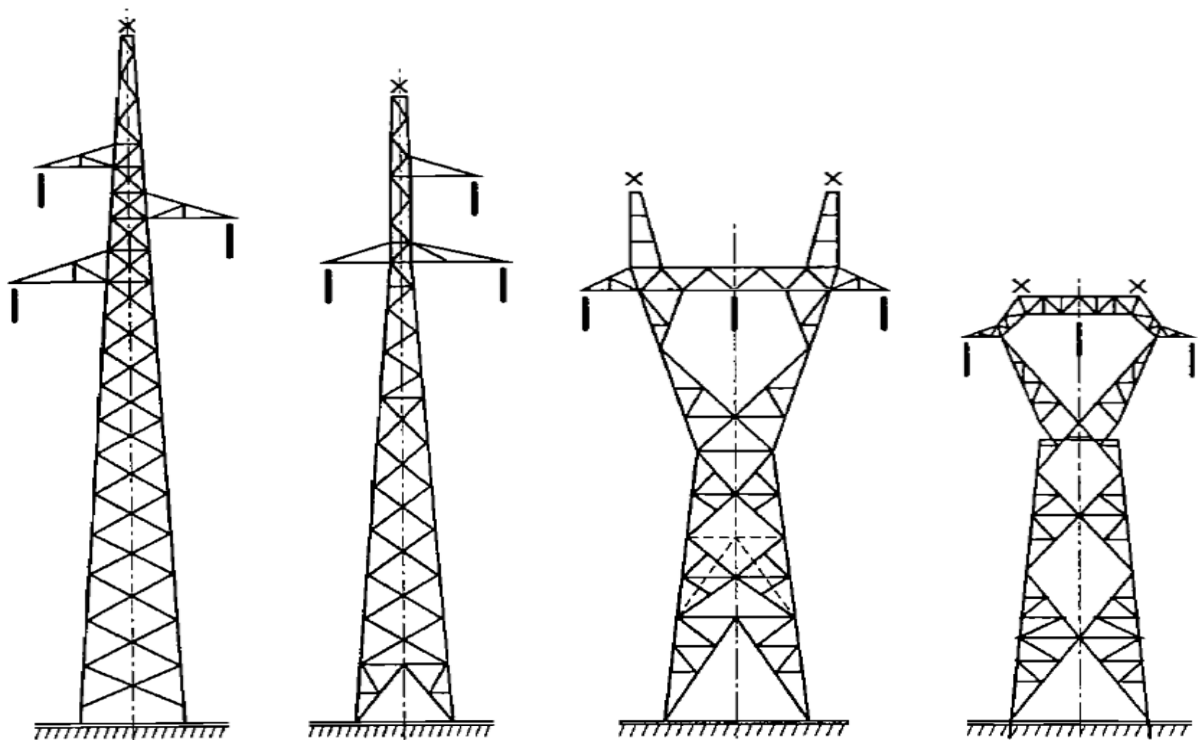
Slika 3.4. Stakleni izolator

3.3. Stupovi

Stupovi osiguravaju propisnu visinu vodiča od tla. Pred stupove se postavljaju veliki zahtjevi jer moraju izdržati sve sile koje djeluju na njih, a te sile ovise o vremenskim uvjetima. Vertikalno prema dolje djeluje težina vodiča, horizontalno u smjeru trase djeluju sile horizontalnog zatezanja vodiča i horizontalno u smjeru okomito na trasu djeluje pritisak vjetra na vodiče [19].

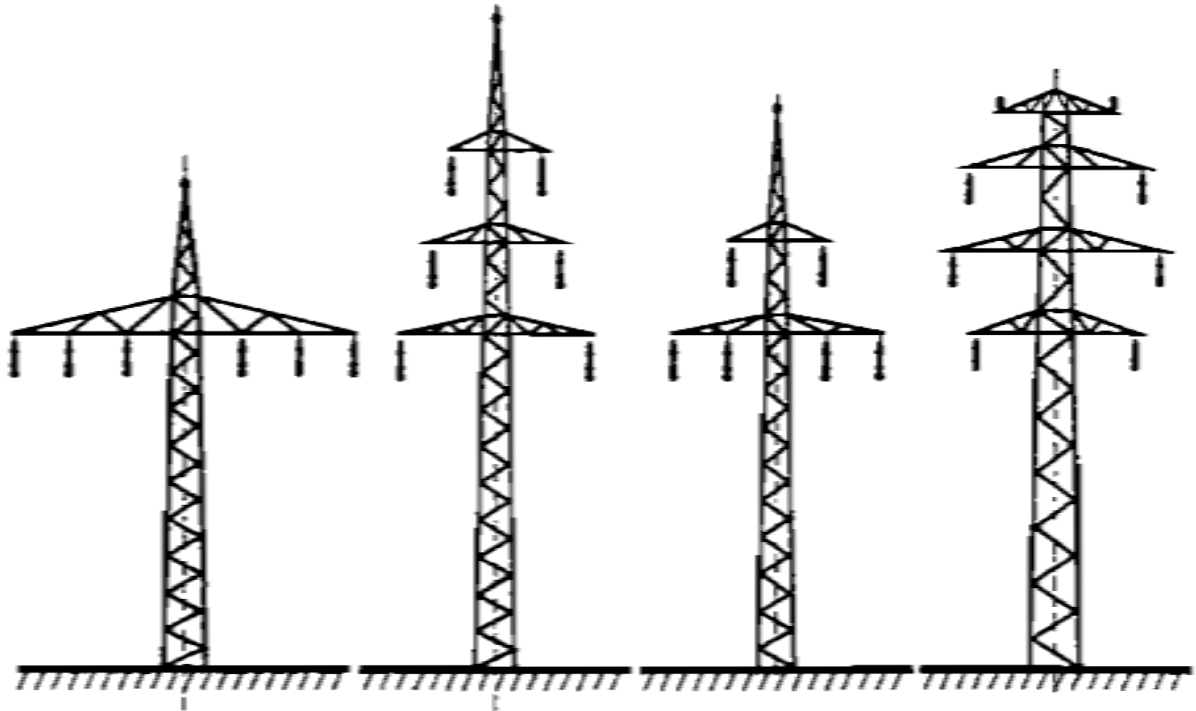
Prema položaju stupova u trasi možemo ih podijeliti na: kutne i linijske, a prema zavješanju vodiča na nosne i zatezne.

Vrste jednostrukih čelično rešetkastih stupova su: jela, modificirana jela, Y-stup i mačka.



Slika 3.5. Jednostruko čelično rešetkasti stupovi [19]

Vrste dvostruko čelično rešetkastih stupova: horizontalni raspored vodiča, dvostruka jela, Dunav i bačva.



Slika 3.6. Dvostruko čelično rešetkasti stupovi [19]

3.4. Spojni, ovjesni i zaštitni pribor

Spojni i ovjesni pribor dalekovoda ključni su elementi jer osiguravaju mehaničku stabilnost i električnu izolaciju vodova. Spojni pribor omogućuje prolaz struje, dok ovjesni pribor ima mehaničku funkciju. Pojedini elementi pribora često imaju višestruku funkciju. Stezaljke i spojnice mogu imati čisto električnu funkciju, čisto mehaničku ili kombiniranu.

Za međusobno spajanje aluminijskih i bakrenih vodiča potrebno je spriječiti koroziju aluminijskih, stoga su razvijene posebne stezaljke i spojnice. Prigušivači vibracija ubrajaju se u zaštitni pribor, njihova svrha je spriječiti zamor materijala vodiča u stezaljci. Ovjesni materijal i pribor izrađuje se od kovanog čelika i od lijevanog aluminijskog [19].



Slika 3.7. Ovjesnik zaštitnog voda i prigušivač vibracija

3.5. Uzemljenje i zaštitna užad

Prema literaturi [1] uzemljenje je „galvanski spoj između metalnog dijela električnog uređaja, postrojenja ili neke točke mreže koja iz bilo kojeg razloga može doći pod naponom“, dok su uzemljivači „metalni dijelovi ukopani u zemlju radi ostvarivanja galvanskog spoja uzemljenog dijela sa zemljom“.

Zaštitno uže ima dvostruku zadaću, štiti od atmosferskih prenapona koji nastaju prilikom udara munje i zaštita prilikom kratkog spoja jer na sebe preuzima dio struje koji bi inače tekao u zemlju. Direktni udarac munje u vodič je najgori slučaj jer dolazi do visokih prenapona koje praktički niti jedna izolacija dalekovoda ne može izdržati. Zbog toga se zaštitno uže postavlja iznad vodiča kao gromobran i uzemljuje se. Udar munje u stup je neugodan jer zbog otpora uzemljenja stup poprima veliki električni potencijal te može doći do povratnog preskoka sa stupa na vodič. Zaštitna uža pomažu na taj način da struju podijele na veći broj stupova. U slučaju udara munje u okolini voda, zaštitna užad smanjuju inducirane prenapone u vodičima.

Uzemljenja se izvode da bi se osigurala sigurnost svih živih bića, da bi se osigurao ispravan rad postrojenja ili mreže i da bi se stabilizirao napon prilikom prijelaznih stanja.

Postoje tri vrste uzemljenja:

- zaštitno – uzemljenje svih metalnih dijelova električnih postrojenja koji ne pripadaju strujnim krugovima radi zaštite ljudi od napona dodira i napona koraka,
- pogonsko – uzemljenje metalnih dijelova koji pripadaju strujnim krugovima elektroenergetskog postrojenja (npr. zvjezdište transformatora),
- gromobranksko – ljudi se štite od električne struje uzrokovane atmosferskim izbijanjem.

Uzemljivače prema vrsti dijelimo na:

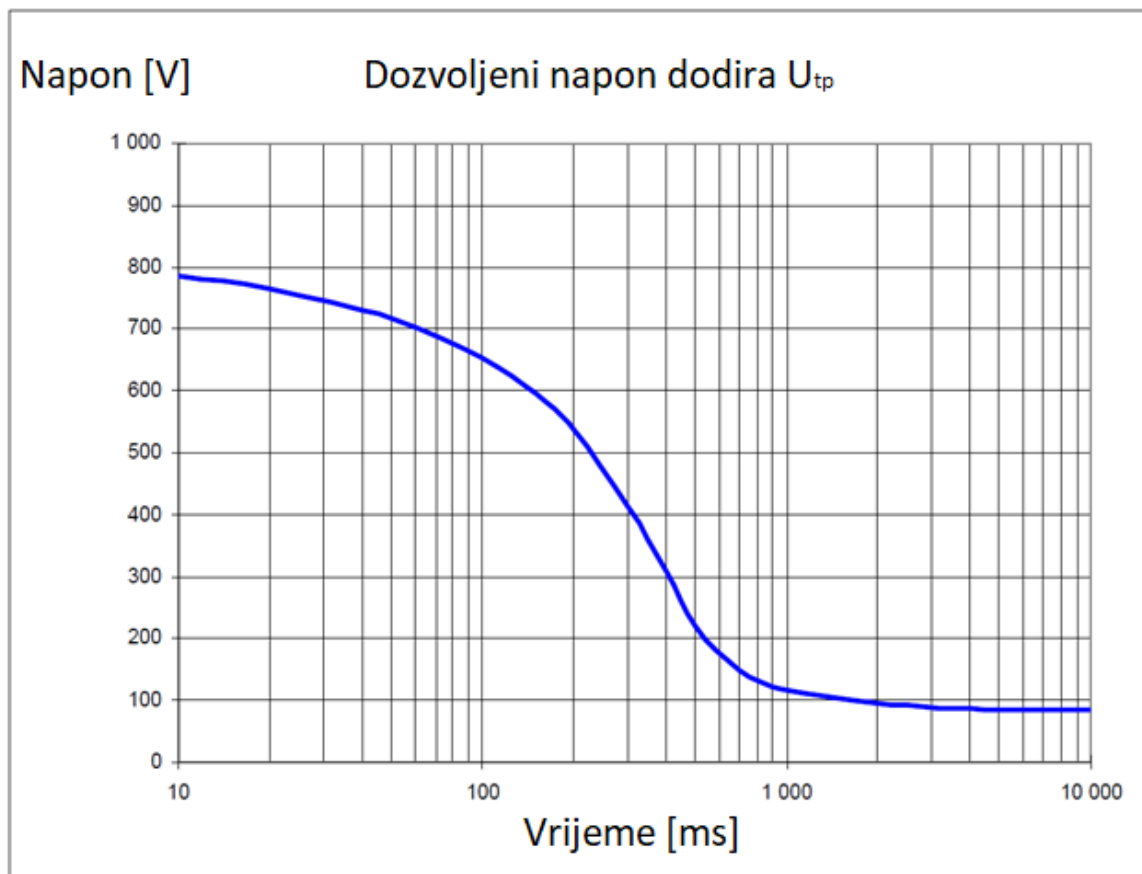
- okomito ukopani uzemljivači (štapni uzemljivači),
- trakasti uzemljivači,
- temeljni uzemljivači,
- sastavljeni uzemljivači,
- prstenasti uzemljivači,
- mrežasti uzemljivači.

Uzemljenje nadzemnog voda obuhvaća cijeli sustav kojemu pripadaju zaštitno uže, sam uzemljivač, te međusobni galvanski spojevi metalnih dijelova koji nisu pod naponom. „Za

uzemljenje dalekovodnih stupova primjenjuje se najčešće trakasto uzemljenje oblikovano kao prstenasto (1-2 prstena na dubini 0,5-1 m oko temelja stupova) ili zrakasto (2-4 zvjezdasto položene trake od stupa u suprotnim smjerovima), a često prstenasto i zrakasto istovremeno.“ Potrebno je odrediti odnosno izmjeriti specifični otpor tla kako bi se izvršio proračun uzemljenja, a nakon njegove izvedbe potrebno je izvršiti kontrolu mjerenjem i po potrebi dodatno proširiti uzemljivač. Prvenstvena funkcija zaštitnog užeta je zaštita faznih vodiča od direktnog udara munje. Doprinosi pouzdanom radu zaštite kod kratkih spojeva prema zemlji i galvanski povezuje uzemljivače svih stupova i time poboljšava cjelokupni sustav uzemljenja [19].

4. NAPON DODIRA I NAPON KORAKA

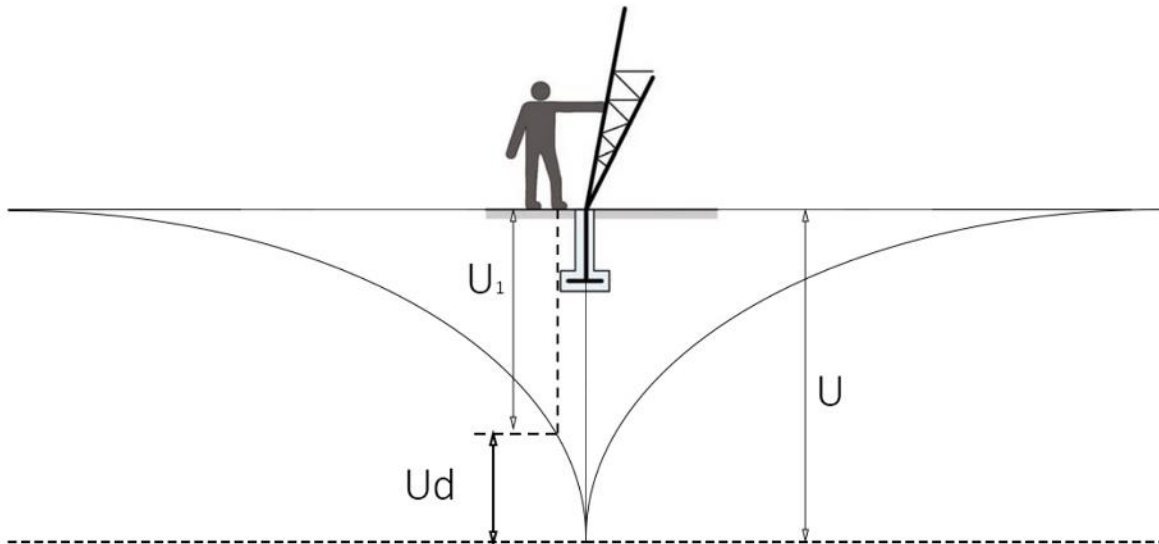
Kada se dogodi kvar ili udar munje, struja poteče u zemlju kroz uzemljenje stupa te potencijal zemljišta u blizini stupa poraste. Ako netko stoji u blizini ili dodiruje stup podnijeti će napon koraka ili napon dodira, a struja će teći kroz noge ili kroz ruku prema nozi ugrožavajući život osobi. Kako bi zaštitili ljude, napon koraka i napon dodira koji su određeni porastom potencijala stupa, vrsti kvara dalekovoda, otpornosti tla i uzemljenja, mora biti ograničen na dopuštenu razinu. Ako dođe do kvara dalekovoda i osoba dođe u blizinu stupa, može doći do strujnog udara. Do nesreća sa strujnim udarom uzrokovanim naponima koraka i dodira događaju se samo kada dalekovod ima kvar, osoba stane u opasno područje s opasnom raspodjelom potencijala i kada je struja koja prolazi kroz njegovo tijelo veća od sigurne struje ljudskog tijela. [20]



Slika 4.1. Dozvoljeni napon dodira [23]

4.1. Napon dodira

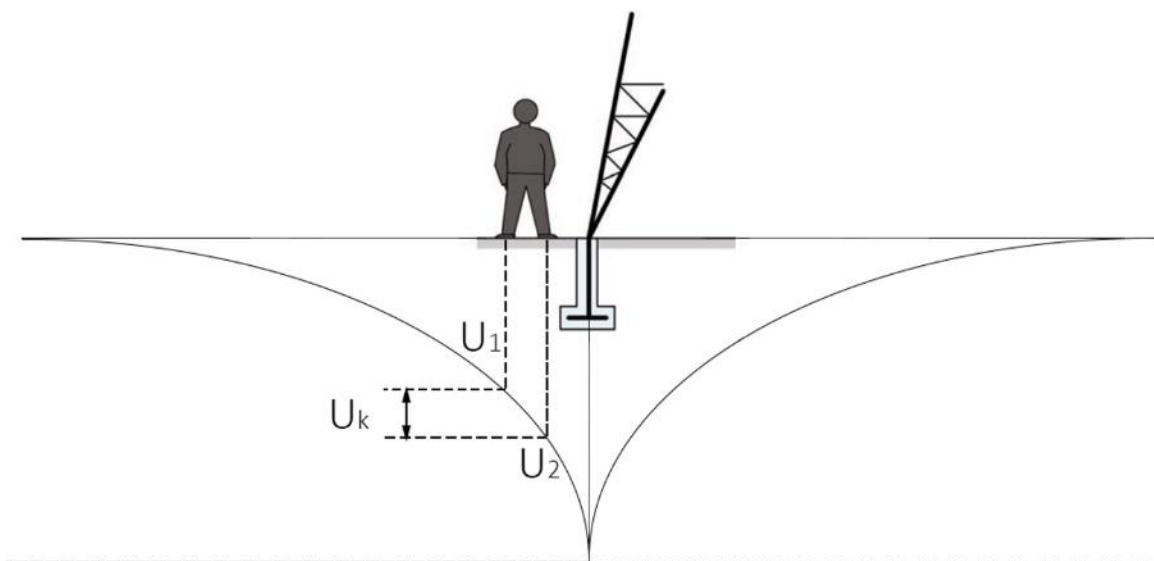
U literaturi [1] autor napon dodira definira kao „Čovjek koji bi stajao na udaljenosti jedan metar od zaštićenog objekta i koji bi rukom dotaknuo zaštićeni objekt kroz čiji uzemljivač taj čas teče struja, bio bi zahvaćen razlikom potencijala.“



Slika 4.2. Napon dodira

4.2. Napon koraka

U literaturi [1] autor napon koraka definira kao „razlika napona koja bi se mogla pojaviti između njegovih nogu kada on hoda po površini tla u vrijeme provođenja struje.“



Slika 4.3. Napon koraka

5. MJERENJE OTPORA RASPROSTIRANJA, NAPONA DODIRA I MJERENJE RASPODJELE POTENCIJALA

Dalekovod se proteže na trasi dužine 6 km te spaja TS 110/35/10 kV Valpovo sa TS 110/6,3 kV Kombinat Belišće. Izveden je čelično-rešetkastim pocinčanim stupovima oblika „jela“. Vodiči su izvedeni od Al/Fe užeta dimenzija $240/40 \text{ mm}^2$, zaštitno uže je izvedeno od AlMg1/Fe dimenzije $95/55 \text{ mm}^2$. Duž trase nalazi se 21 stup od čega je 13 nosnih i 8 zateznih s prosječnim rasponom 272,6 m. Tip uzemljivača: 17 stupova ima prstenasti uzemljivač, 4 stupa imaju uzemljivač u obliku dva koncentrična prstena.



Slika 5.1. Stup broj 16, oblik stupa „jela“

5.1. Opis mjernih postupaka

5.1.1. Mjerenje otpora uzemljenja i raspodjele potencijala U-I metodom

Otpor uzemljenja uzemljivača može se odrediti puštanjem izmjenične struje poznatog iznosa kroz uzemljivač i mjerenjem pada napona na njegovom otporu. Potrebno je pomoćnu sondu S_2 zabiti u zemlju na dovoljnoj udaljenosti od uzemljivača te priključiti izmjenični napon U između uzemljivača Z i sonde S_2 . Gustoća struje u zemlji biti će najveća u blizini uzemljivača Z i sonde S_2 , što uzrokuje najveći pad napona upravo na tim mjestima. Kako bi se izmjerila raspodjela potencijala, potrebno je zabiti još jednu pomoćnu sondu S_1 između uzemljivača i sonde S_2 . Pad napona između uzemljivača Z i pomoćne sonde S_1 mjeri se voltmetrom dovoljno velikog unutarnjeg otpora. Izmjereni pad napona predstavlja pad napona na otporu ispitivanog uzemljivača. Sondu S_1 je potrebno postaviti dovoljno daleko od uzemljivača Z i sonde S_2 , odnosno na mjesto gdje je gustoća struje zanemarivo mala.

Otpor uzemljivača Z se dobije temeljem Ohmovog zakona iz izmjenične struje I i pada napona U_{Z-S_1} očitano na voltmetru. Da bi pogreška u mjerenju otpora R_Z bila što manja, otpor voltmetra treba biti barem 10 puta veći od otpora uzemljenja sonde S_1 .

Potencijal uzemljivača prema referentnoj zemlji za vrijeme trajanja kratkog spoja izračunava se na sljedeći način:

$$U = (U_Z - U_{mj})_{max} \cdot \frac{I_Z}{I_{zm}} \quad (5-1)$$

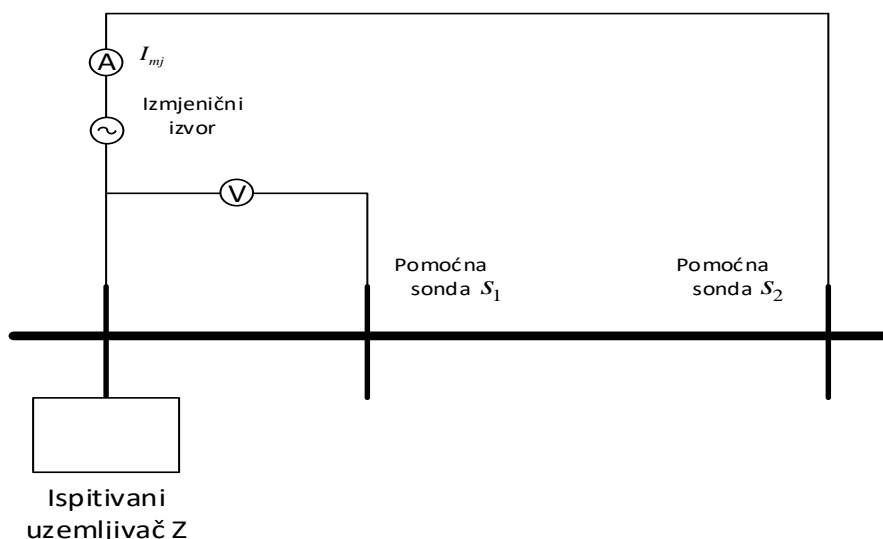
gdje su:

U – potencijal uzemljivača,

$(U_Z - U_{mj})_{max}$ – maksimalni iznos izračunate vrijednosti napona mjerne točke prema referentnoj zemlji,

I_Z – maksimalni očekivani iznos struje kratkog spoja koja se zatvara kroz uzemljivački sustav,

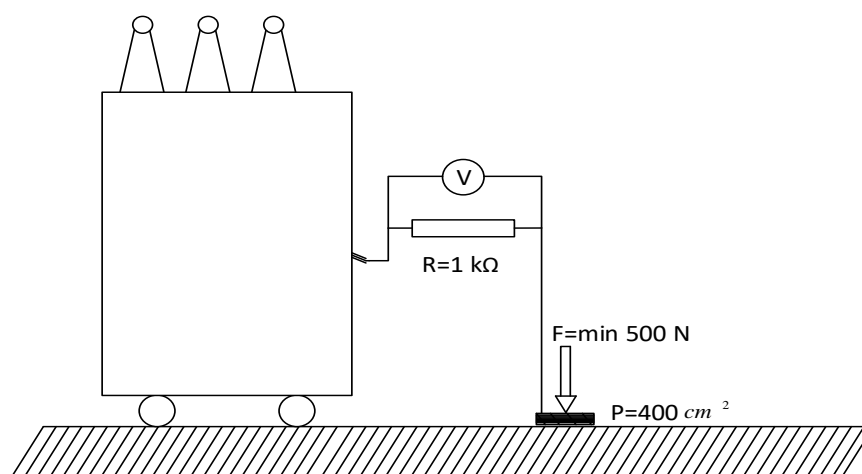
I_{zm} – iznos izmjerene vrijednosti utisnute struje u uzemljivač.



Slika 5.2. Princip mjerenja otpora rasprostiranja i raspodjele potencijala

5.1.2. Mjerenje napona dodira U-I metodom

Za određivanje je li uzemljenjem postignuta dovoljna sigurnost, mjerodavan je napon dodira. Napon dodira se mjeri uz formirani strujni krug između uzemljivača Z i pomoćne sonde S₂ te se tako dobiveni iznos preračunava na očekivanu struju kvara. Bakrena ploča površine 400 cm² je korištena kao mjerna elektroda na tlu, za simulaciju noge. Prilikom mjerenja pločica je pritisnuta silom od najmanje 500 N. Ukoliko je na mjestu mjerenja podloga bila suho tlo ili beton, ispod bakrene ploče je stavljena mokra krpa. Kao druga mjerna elektroda za simulaciju ruke korištena je kožna rukavica omotana metalnom trakom. Ukoliko je mjesto dodira zahrđalo ili prelakirano, turpijom je očišćena površina da bi se ostvario što bolji kontakt s metalnom površinom. Obje mjerne elektrode su spojene na otpornik 1 kΩ koji predstavlja čovjeka. Paralelno na otpornik spojen je voltmetar koji mjeri napon na nadomjesnom otporniku.



Slika 5.3. Princip mjerenja napona dodira

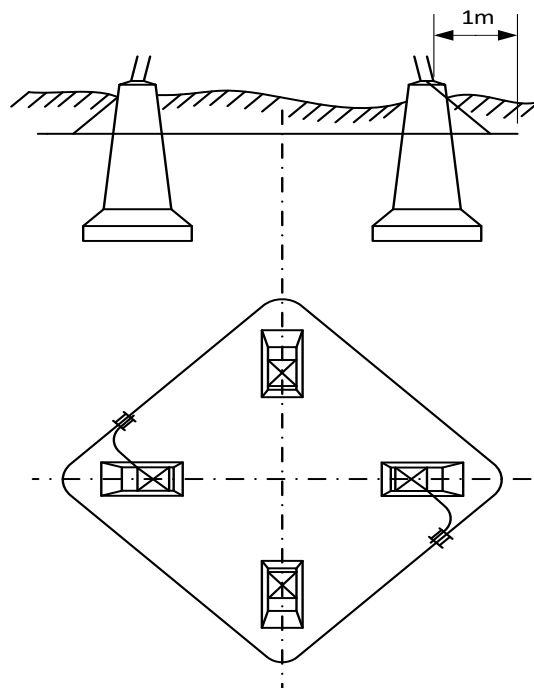
Rezultati mjerenja napona dodira (U_{dm}) preračunavaju se omjerom izračunate struje kvara u postrojenju koja se zatvara kroz uzemljivač (I_u) sa strujom koja je tekla u uzemljivač tijekom mjerenja (I_{um}). Napon dodira (U_d) u slučaju kvara izračunava se prema:

$$U_d = U_{dm} \frac{I_u}{I_{um}} \quad (5-2)$$

Preračunate vrijednosti napona dodira se uspoređuju s dozvoljenim vrijednostima napona dodira u ovisnosti o trajanju kvara kroz uzemljivač.

Za sva navedena mjerenja korišten je multifunkcionalni mjerni sustav Omicron CPC 100. Ovaj mjerni sustav se sastoji od selektivnog izvora mjerne struje prilagodljive frekvencije 15-400 Hz i selektivnog mjernog prijamnika (voltmetra). Za mjerenje je korištena frekvencija od 70 Hz kako bi se izbjegao utjecaj lutajućih struja pogonske frekvencije i viših harmonika. Za napajanje ovog sustava korišten je mrežni napon iz prenosivog benzinskog agregata.

5.2. Mjerenje raspodjele potencijala



Slika 5.4. Prikaz prstenastog uzemljivača u obliku jednog koncentričnog prstena

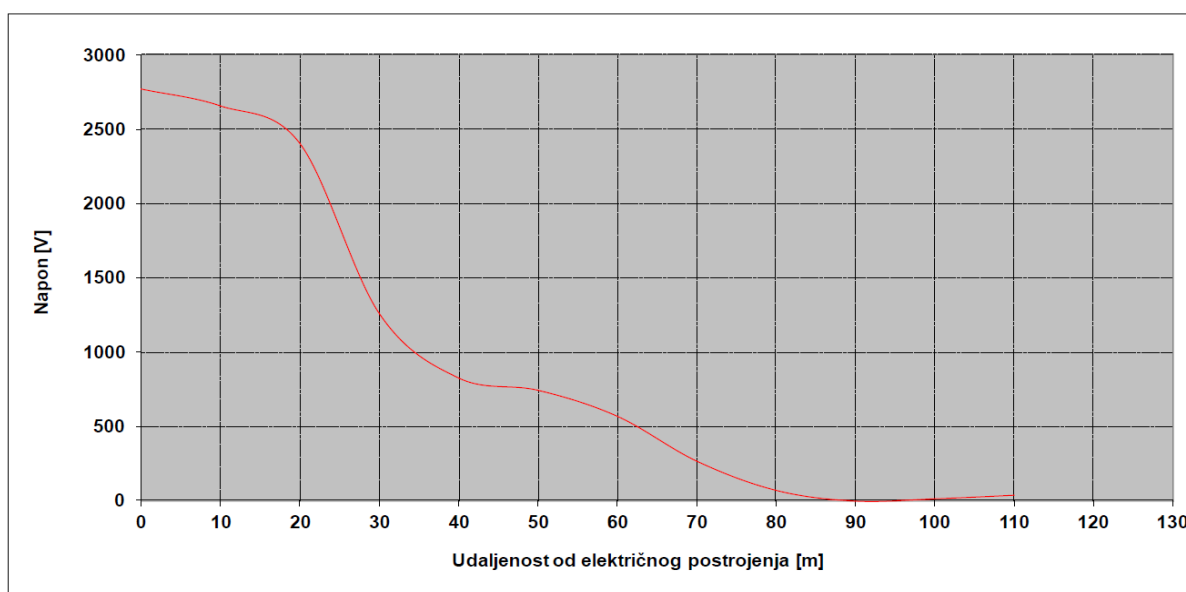
Tablica 5.1. Raspodjela potencijala za stup broj 14

		Imj=4,988 A		Iz=10900 A	
Red. br.	Udaljenost l (m)	Umj (V)	Uz-Umj (V)	U (V)	U (%)
MT1	0	35,315	1,268	2771,2	100,0 %
MT2	10	35,367	1,216	2657,5	95,9 %
MT3	20	35,482	1,101	2406,2	86,8 %
MT4	30	36,005	0,578	1263,2	45,6 %
MT5	40	36,204	0,379	828,3	29,9 %
MT6	50	36,242	0,341	745,2	26,9 %
MT7	60	36,322	0,261	570,4	20,6 %
MT8	70	36,460	0,123	268,8	9,7 %
MT9	80	36,550	0,033	72,1	2,6 %
MT10	90	36,583	0,00	0,0	0,0 %
MT11	100	36,576	0,007	15,3	0,6 %
MT12	110	36,565	0,018	39,3	1,4 %

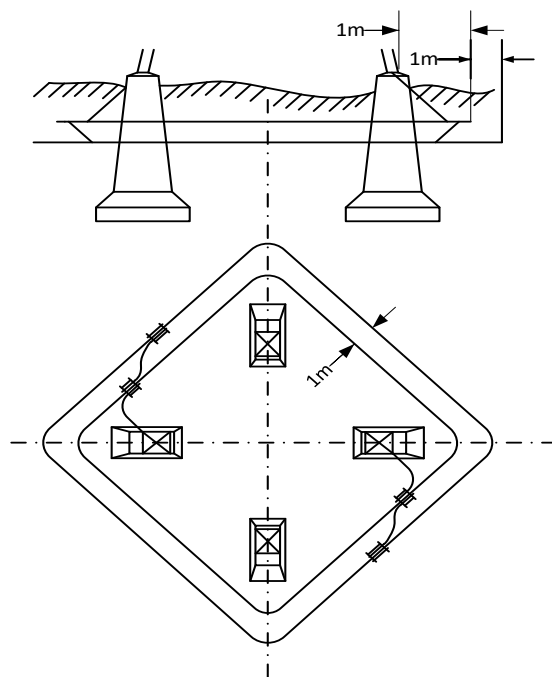
Izračun potencijala mjerne točke 1 stupa broj 14:

$$U = (U_z - U_{mj})_{max} \cdot \frac{I_z}{I_{zm}}$$

$$U = (36,583 - 35,315) \cdot \frac{10900}{4,988} = 2771 \text{ V}$$



Slika 5.5. Raspodjela potencijala stup broj 14 [24]



Slika 5.6. Prikaz prstenastog uzemljivača u obliku dvostrukog koncentričnog prstena

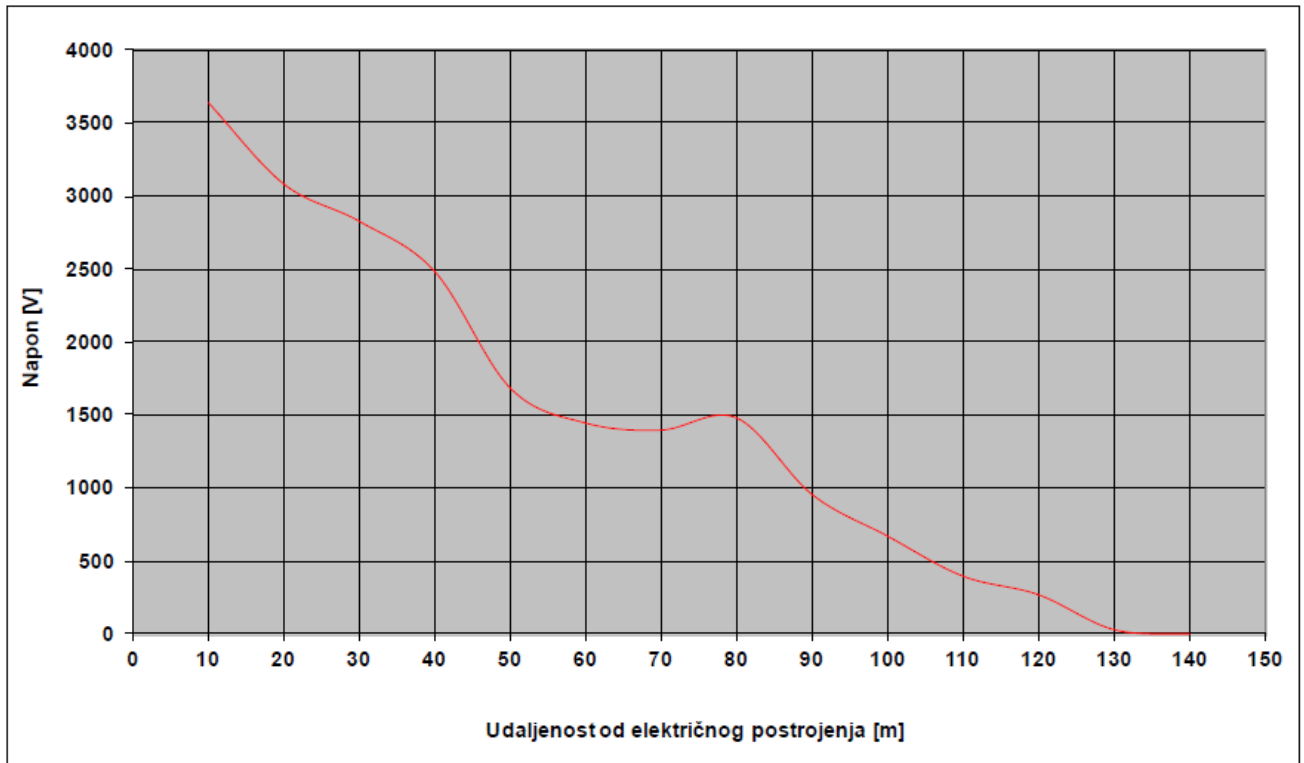
Tablica 5.2. Raspodjela potencijala za stup broj 20

Red. br.	Udaljenost l (m)	Imj=5,016 A		Iz=10900 A	
		Umj (V)	Uz-Umj (V)	U (V)	U (%)
MT1	10	26,455	1,674	3635,9	100,0 %
MT2	20	26,587	1,542	3349,4	92,1 %
MT3	30	26,814	1,315	2855,7	78,5 %
MT4	40	26,987	1,142	2480,6	68,2 %
MT5	50	27,354	0,775	1683,4	46,3 %
MT6	60	27,464	0,665	1444,5	39,7 %
MT7	70	27,486	0,643	1396,7	38,4 %
MT8	80	27,448	0,681	1479,2	40,7 %
MT9	90	27,689	0,440	955,7	26,3 %
MT10	100	27,820	0,309	670,5	18,4 %
MT11	110	27,947	0,183	396,4	10,9 %
MT12	120	28,005	0,124	269,3	7,4 %
MT13	130	28,115	0,014	30,4	0,8 %
MT14	140	28,129	0,00	0,00	0,0 %
MT15	150	28,129	0,00	0,00	0,0 %

Izračun potencijala mjerne točke 1 stupa broj 20:

$$U = (U_z - U_{mj})_{max} \cdot \frac{I_z}{I_{zm}}$$

$$U = (28,129 - 26,445) \cdot \frac{10900}{5,016} = 3637 \text{ V}$$



Slika 5.7. Raspodjela potencijala stup broj 20 [24]

5.3. Mjerenje napona dodira

Tablica 5.3. Rezultat mjerenja napona dodira stup broj 14

Redni broj	Vrsta tla	Izm	Udm (mV)	Iz (kA)	Ud (V)	Opaska
MT1	Zemlja	4,90	8,00	10,9	17,80	Mokro tlo

Tablica 5.4. Rezultat mjerenja napona dodira stup broj 20

Redni broj	Vrsta tla	Izm	Udm (mV)	Iz (kA)	Ud (V)	Opaska
MT1	Zemlja	5,02	8,35	10,9	18,13	Mokro tlo

Napon dodira na stupu broj 14:

$$U_d = U_{dm} \frac{I_u}{I_{um}}$$

$$U_d = 8 \cdot 10^{-3} \frac{10900}{4,90} = 17,80 \text{ V}$$

Napon dodira na stupu broj 20:

$$U_d = 8,35 \cdot 10^{-3} \frac{10900}{5,02} = 18,13 \text{ V}$$

5.4. Otpor rasprostiranja uzemljivača stupa bez spoja sa zaštitnim užetom

Odspajanjem prstenastog uzemljivača od stupa odnosno zaštitnog užeta može se izmjeriti otpor rasprostiranja samog uzemljivača tj. prstena. Ta vrijednost ne smije prelaziti određenu granicu koja se računa prema sljedećoj formuli:

$$R_{uz} < \frac{U_i}{I_u} \quad (5-3)$$

gdje su:

R_{uz} – otpor uzemljenja promatranog stupa bez spoja sa zaštitnim užetom,

I_u – tjemena vrijednost udarne struje groma (kA) – 40 kA,

U_i – podnosivi udarni napon izolatora u suhom (kV) – prema propisima 450 kV.

$$R_{uz} = \frac{U_i}{I_u} \quad (5-4)$$

$$R_{uz} = \frac{450}{40} = 11,25 \Omega$$

Izmjerena vrijednosti otpora uzemljivača stupa 14 iznosi: 7,08 Ω , a za stup 20: 5,27 Ω . Mjerenja otpora uzemljenja su pokazala da su vrijednosti ispod dozvoljene vrijednosti od 11,25 Ω dobivene proračunom, te da su uzemljenja stupova ispravna.



Slika 5.8. Mjesto odvajanja uzemljivača od stupa i zaštitnog užeta

6. REZULTATI I SIMULACIJA

6.1. Opis modela

Za izradu modela korišten je program XGSLab. Program ima niz modula: GSA – analiza sustava uzemljenja, GSA_FD – analiza sustava uzemljenja u frekvencijskoj domeni, XGSA_TD XGSA_FD – Nadzemna i podzemna analiza sustava u vremenskoj i frekvencijskoj domeni, NETS – Rješavanje mreža i SHIELD – zaštita od munje [21]. Korišteni modul je GSA koji se koristi za analizu sustava uzemljenja niskih frekvencija malih i srednjih postrojenja. Također, može se koristiti za analizu otpornosti tla, sezonsku analizu otpornosti tla i višeslojno modeliranje tla [22].

Korišteni standard EN 50522:2010.

Maksimalni očekivani iznos struje kratkog spoja $I = 10900 \text{ A}$.

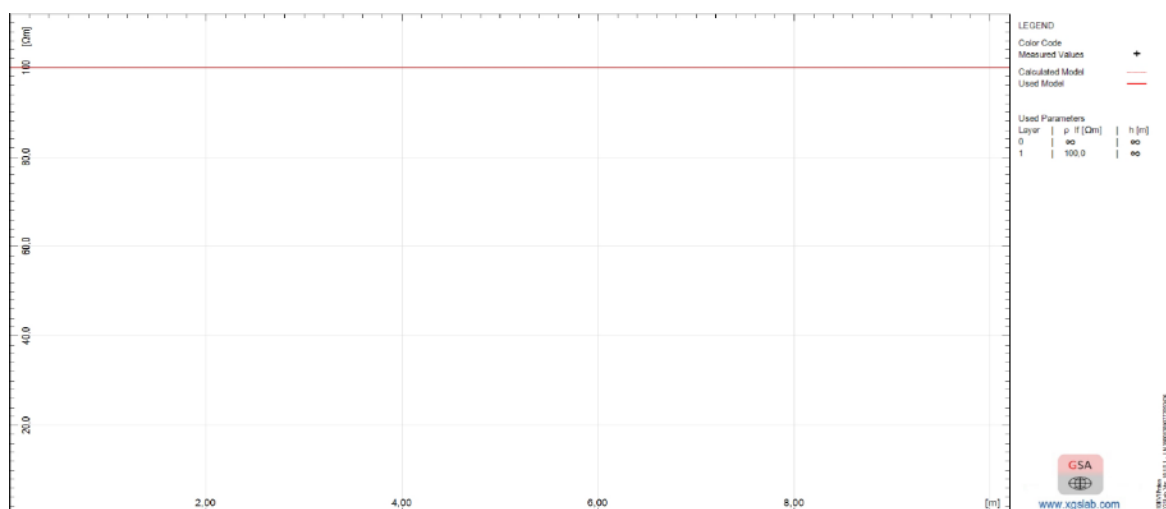
Ako pretpostavimo da je otpor rasprostiranja svih stupova jednak i da se otpor zaštitnih vodiča može zanemariti, struju I možemo podijeliti s brojem stupova n kako bismo dobili očekivanu vrijednost struje za jedan stup.

$$I_z = \frac{I}{n}$$

$$I_z = \frac{10900}{21} = 519 \text{ A}$$

Iznos očekivane struje na pojedinom stupu $I_z = 519 \text{ A}$.

Duljina trajanja kvara $t_f = 0,15 \text{ s}$.

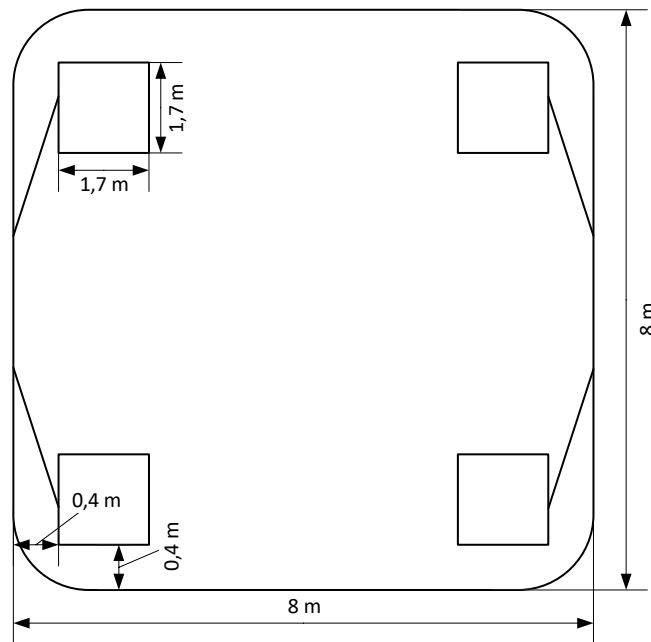


Slika 6.1. Specifični otpor zemlje

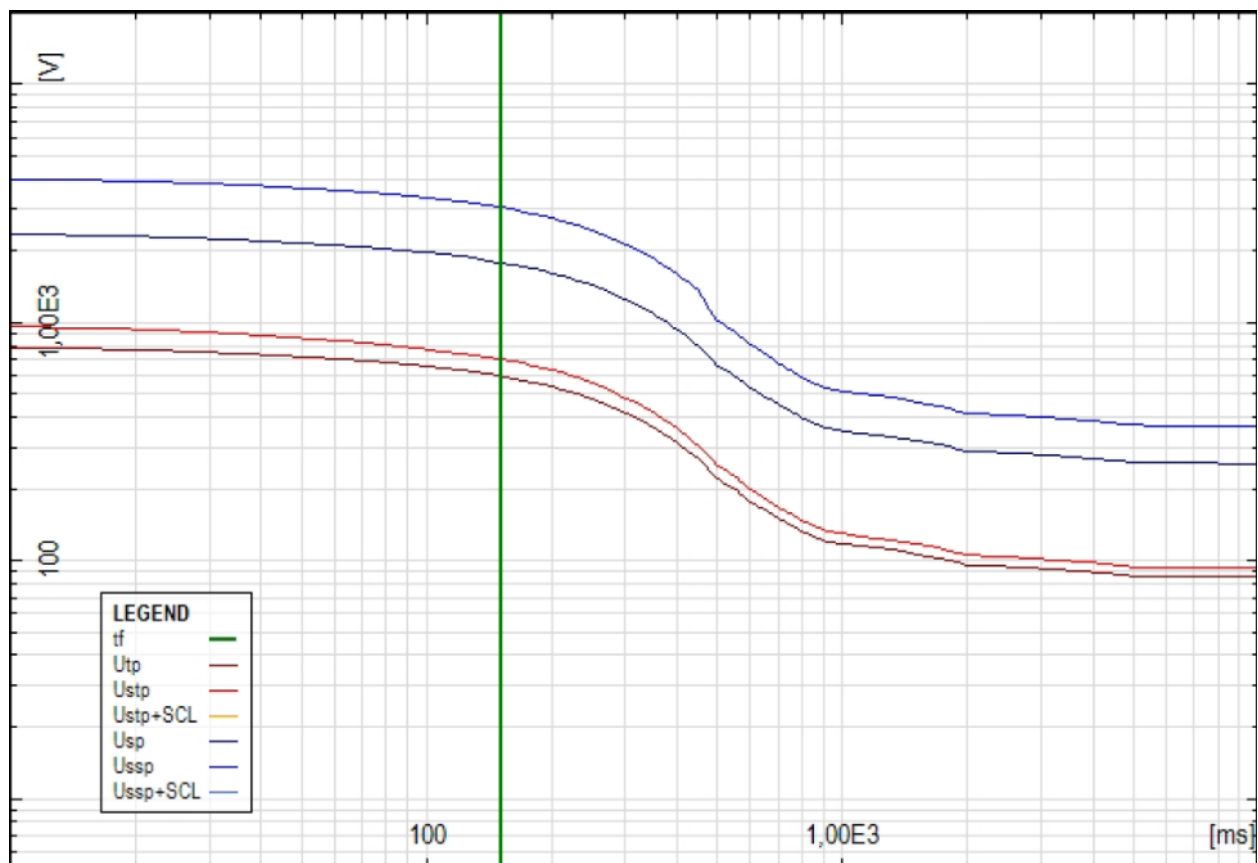
Vrijednost specifičnog otpora zemlje iznosi $\rho = 100 \Omega\text{m}$ i korištena je u promatranju oba modela uzemljivača stupa dalekovoda.

6.2. Model s jednim prstenastim uzemljivačem

Provođenjem simulacije dobiveni su rezultati prikazani na slikama. Otpor rasprostiranja uzemljivača iznosi $R_e = 6,663 \Omega$. Duljina uzemljivača iznosi 65,6 m.



Slika 6.2. Prikaz dimenzija modela uzemljivača u obliku jednog koncentričnog prstena



Slika 6.3. Dozvoljene vrijednosti napona dodira i napona koraka

Tablica 6.1. Dozvoljene vrijednosti napona dodira i napona koraka

tf	Rsh	Rgl	Utp	Usp	Ustp	Ussp	Ustp+SCL	Ussp+SCL
[s]	[Ω]	[Ω]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
0,15	0,00	0,00	595,50	1786,50	700,97	3042,62	700,97	3042,62

tf – vrijeme trajanja kvara

Rsh – otpor cipela

Rgl – otpor rukavica

Utp – Napon dodira

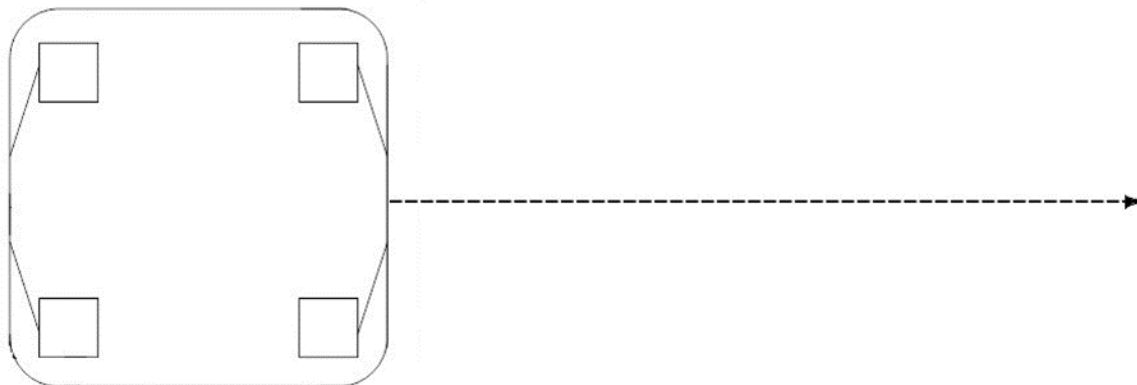
Usp – Napon koraka

Ustp – dozvoljeni napon dodira

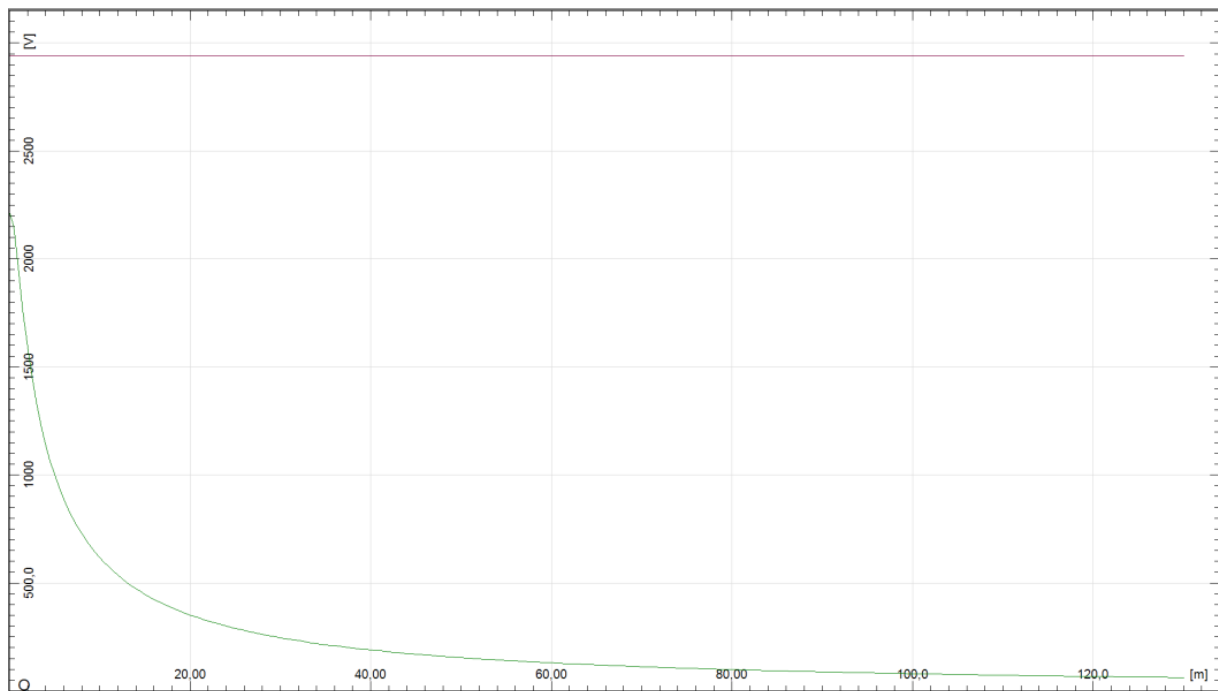
Ussp – dozvoljeni napon koraka

$U_{stp} + SCL$ – dozvoljeni napon dodira + pokrovni sloj tla

$U_{ssp} + SCL$ – dozvoljeni napon koraka + pokrovni sloj tla

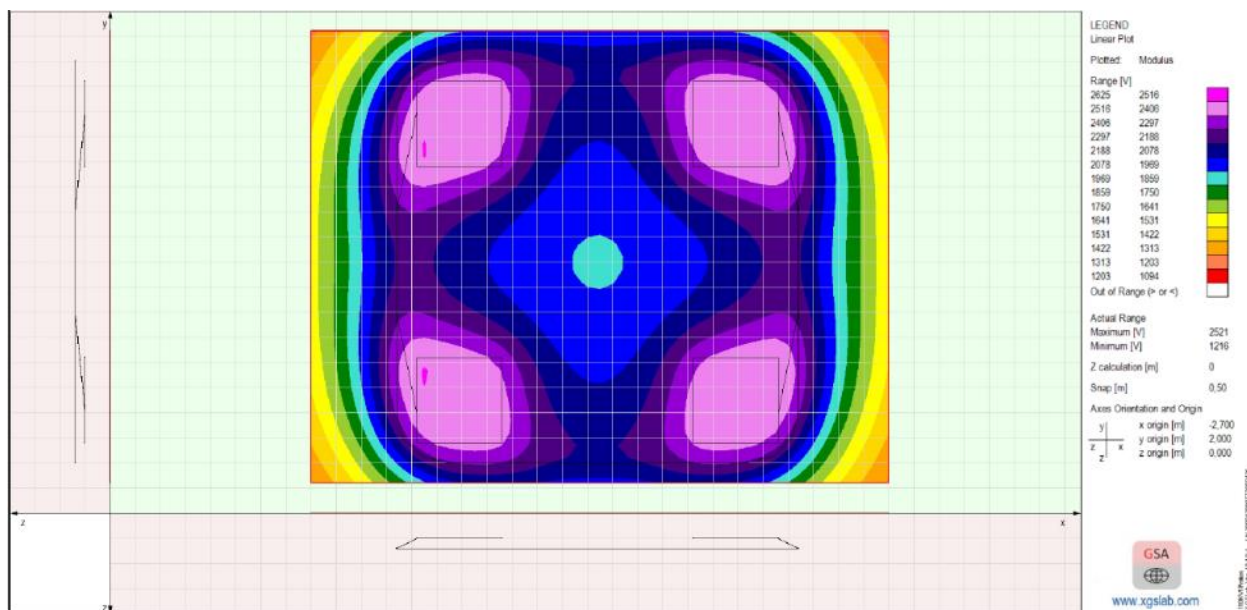


Slika 6.4. Prikaz smjera za izračun linijske raspodjele potencijala zemljišta

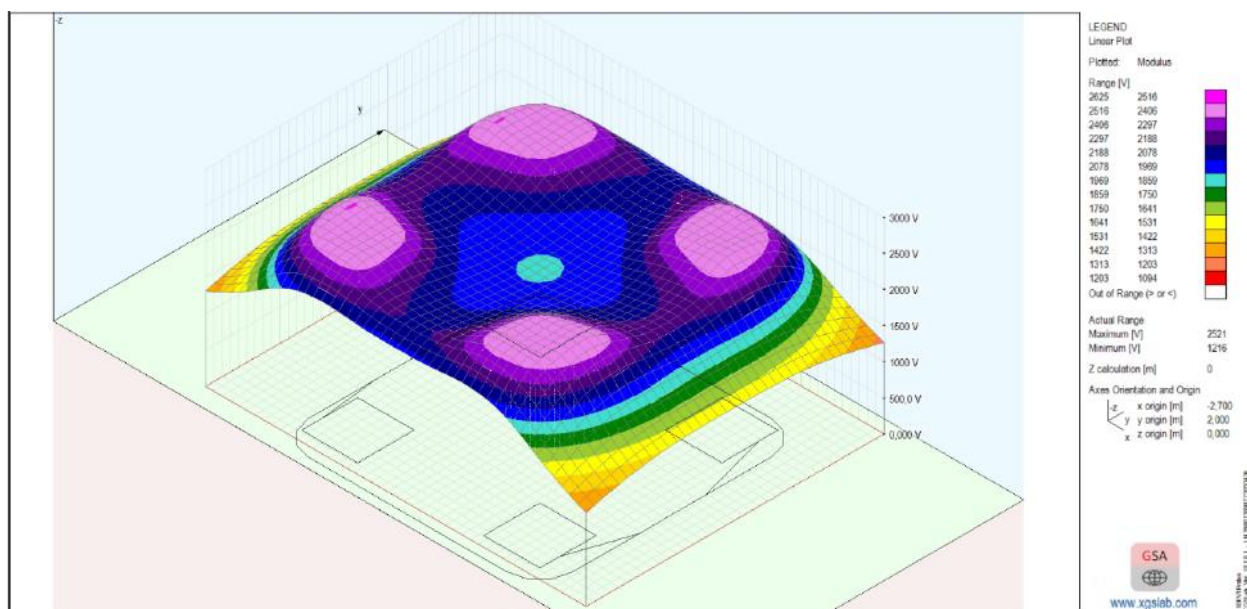


Slika 6.5. Linijski prikaz raspodjele potencijala zemljišta

Slika 6.5. prikazuje linijsku raspodjelu potencijala gdje se može vidjeti da je vrijednost najveća uz sami uzemljeni stupa. Najveća vrijednost iznosi 2200 V, a na udaljenosti 40 m od stupa ta vrijednost iznosi samo 10 % odnosno 220 V.

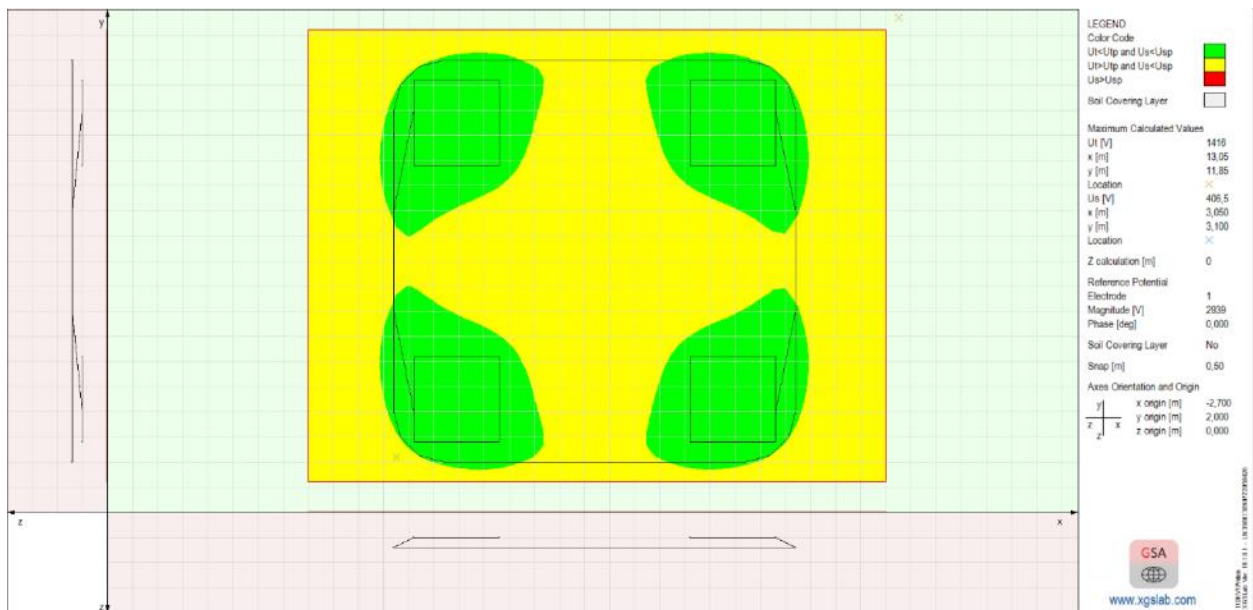


Slika 6.6. 2D – prikaz raspodjele potencijala zemljišta



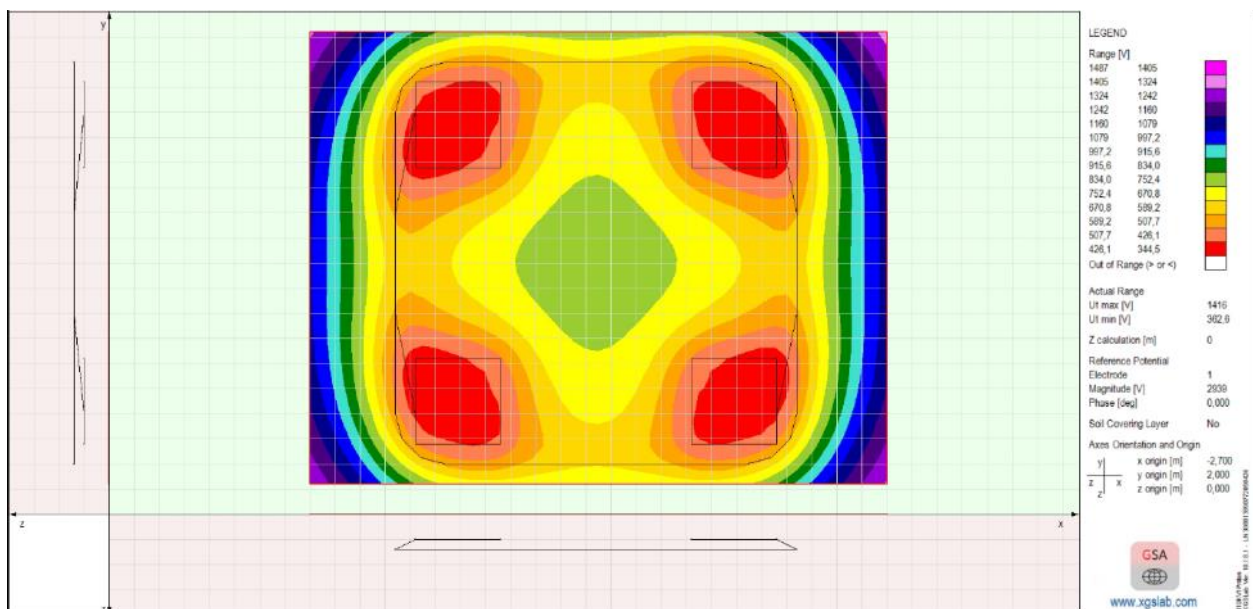
Slika 6.7. 3D – prikaz raspodjele potencijala zemljišta

Slike 6.6. i 6.7. prikazuju raspodjelu potencijala zemljišta za vrijeme trajanja kratkog spoja. Vršna vrijednost potencijala zemljišta iznosi 2625 V i ona se nalazi najbliže stupu odnosno oko temelja stupa. Udaljavanjem od stupa, odnosno uzemljivača vrijednost potencijala se smanjuje i najniža vrijednost na analizom obuhvaćenom području iznosi 1094 V.

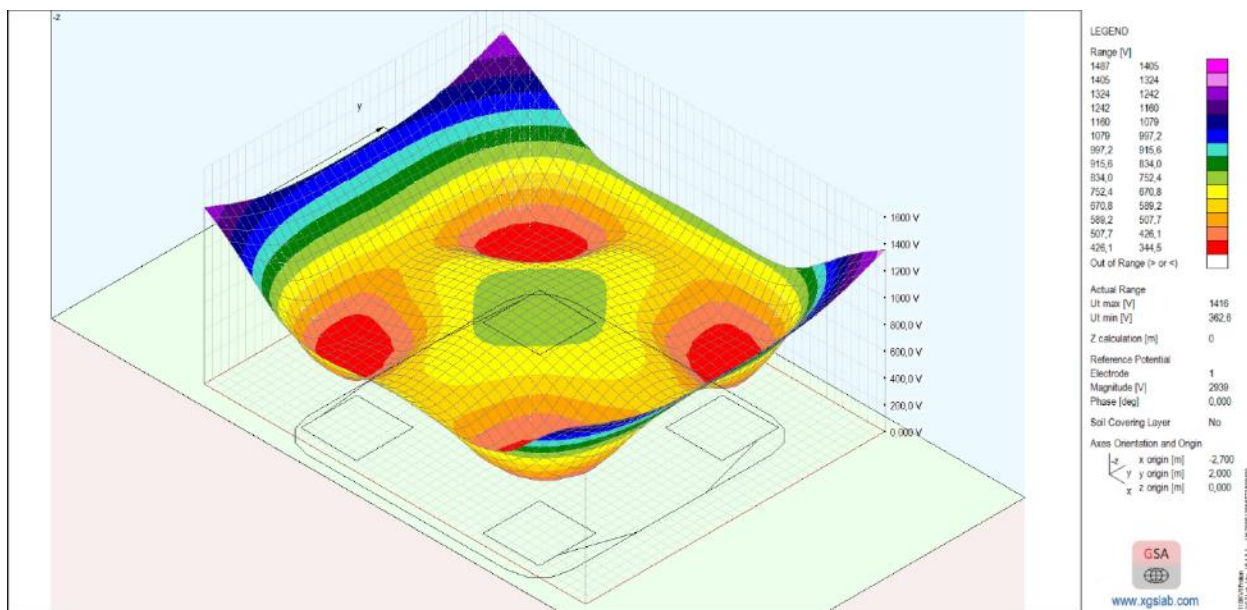


Slika 6.8. Prikaz sigurnih područja

Slika 6.8. prikazuje područja koja su sigurna za ljude i životinje u slučaju kratkog spoja. Zelenom bojom su označena područja čije vrijednosti napona dodira i napona koraka su manje od dozvoljenih vrijednosti, a žutom bojom su označena područja u kojima je napon koraka manji od dozvoljene vrijednosti, a napon dodira veći od dozvoljene vrijednosti. Iako je napon dodira veći od dozvoljene vrijednosti nema opasnosti za ljude jer metalni dijelovi nisu u dohvatu ruku.

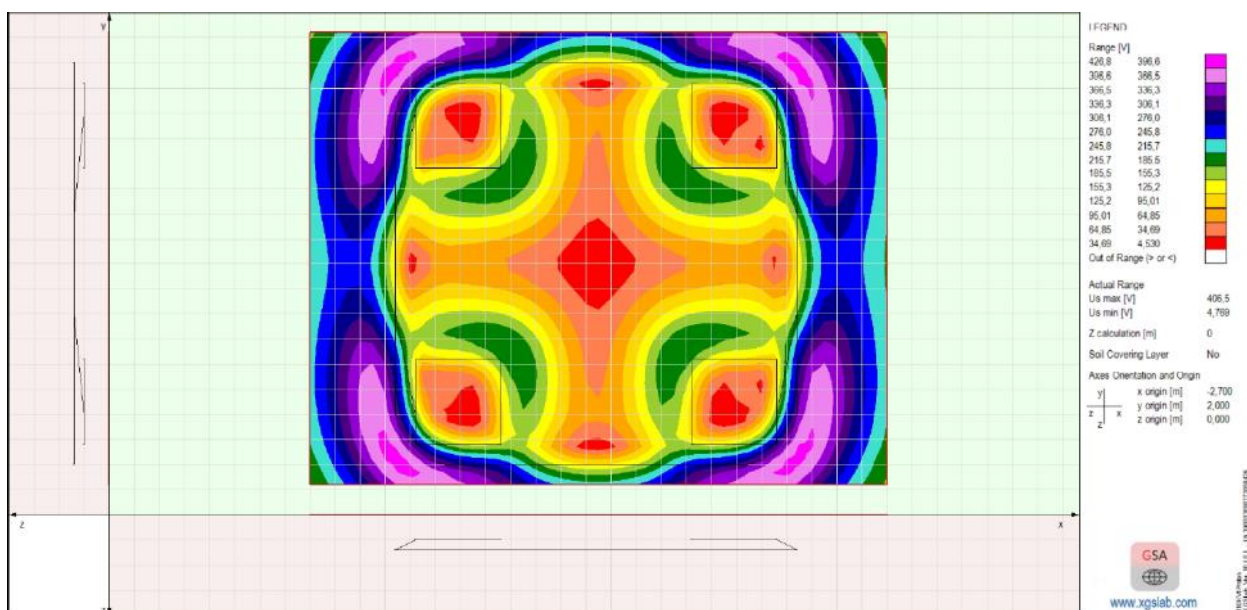


Slika 6.9. 2D – prikaz raspodjele napona dodira

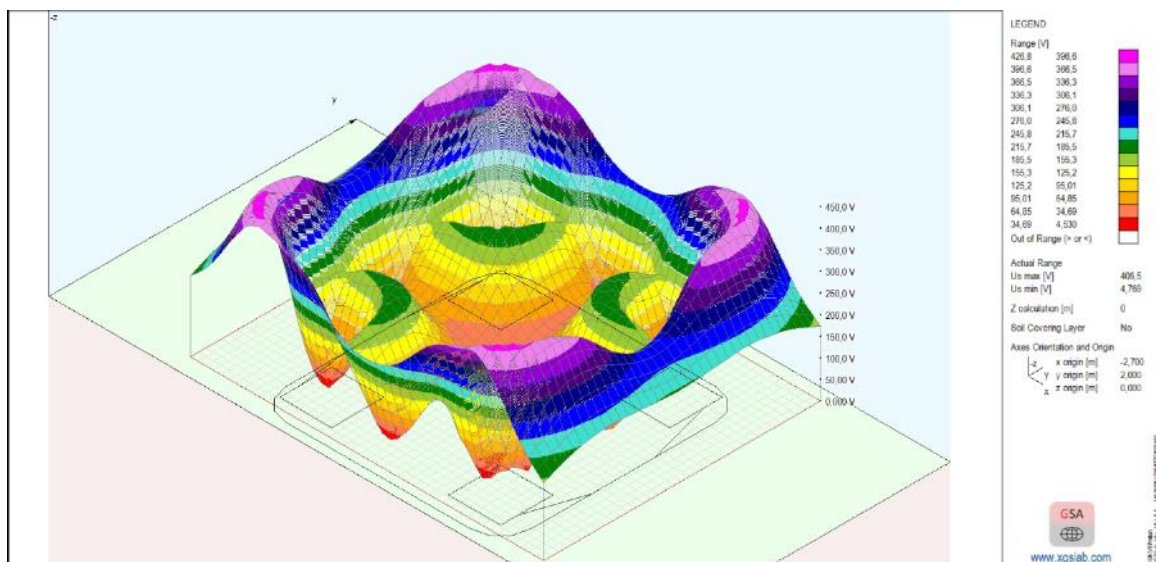


Slika 6.10. 3D – prikaz raspodjele napona dodira

Slike 6.9. i 6.10. prikazuju raspodjelu napona dodira za vrijeme trajanja kratkog spoja. Vršna vrijednost napona dodira iznosi 1487 V, a najmanja 344,5 V. Najmanja vrijednost napona dodira nalazi se uz sami stup gdje se može i ostvariti fizički kontakt. Udaljavanjem od stupa napon dodira se povećava, ali se povećala i udaljenost te se onemogućio fizički kontakt. Dobivene vrijednosti napona dodira su unutar granica koje su dane normom HRN EN 50522. Vrijednost dozvoljenog napona dodira za $t_f = 150$ ms iznosi 600 V što se može očitati sa slike 4.1..



Slika 6.11. 2D – prikaz raspodjele napona koraka

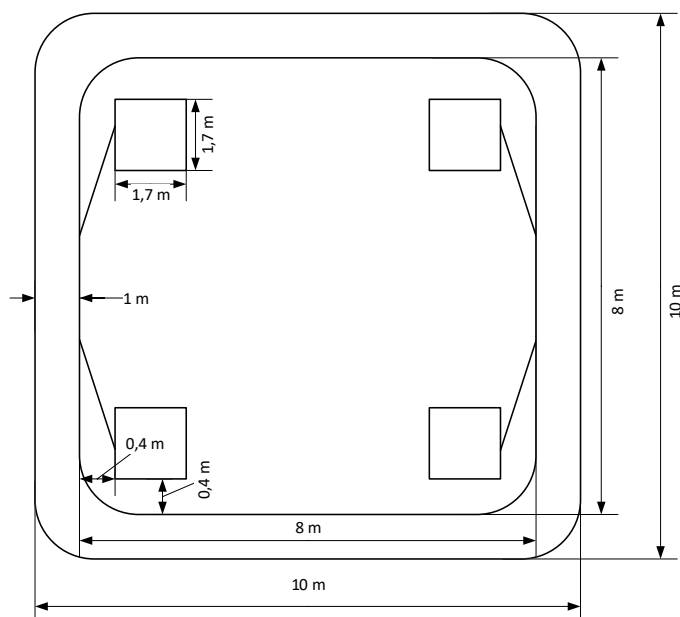


Slika 6.12. 3D – prikaz raspodjele napona koraka

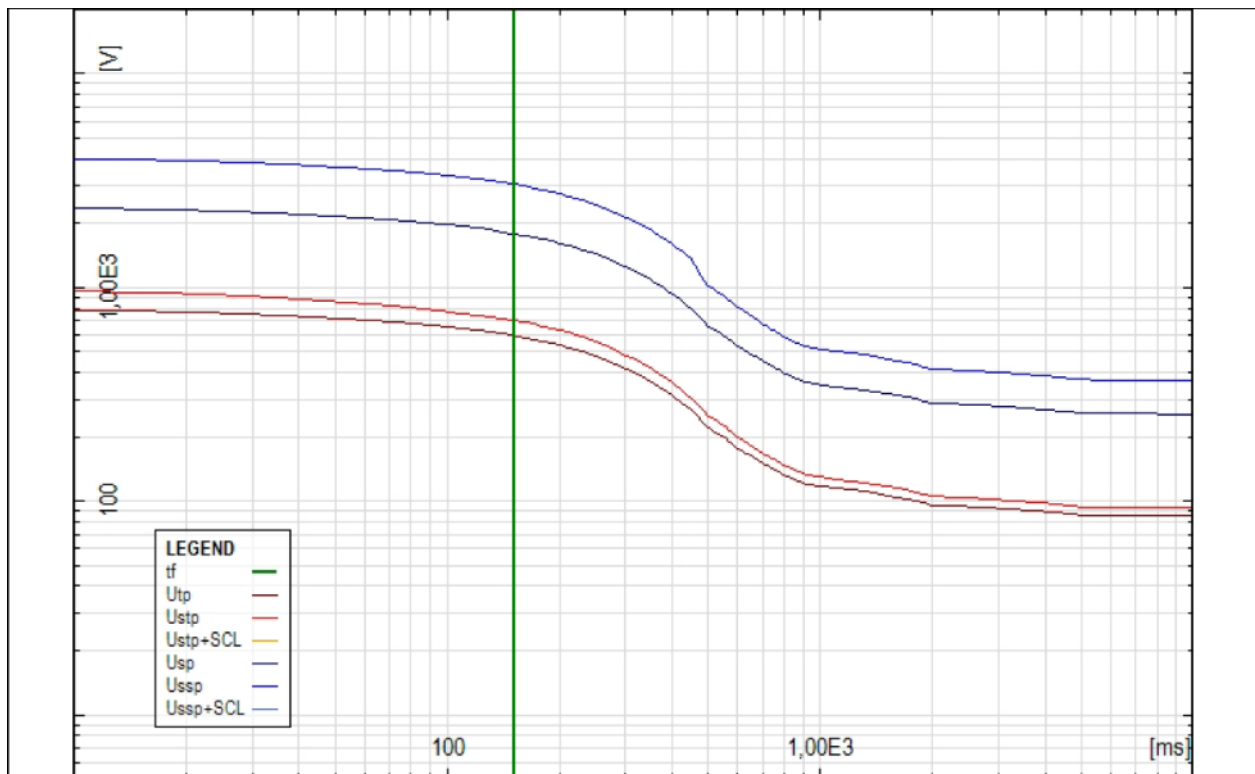
Slike 6.11. i 6.12. prikazuju raspodjelu napona koraka za vrijeme trajanja kratkog spoja. Vršna vrijednost napona koraka iznosi 426,8 V, a najmanja vrijednost 4,5 V. Iz slika je vidljivo kako je najveća vrijednost napona koraka u blizini uzemljivača, a što se više udaljavamo od njega vrijednost opada. Također je vidljivo kako se najmanja vrijednost napona 4,5 V nalazi u samom središtu stupa jer je gradijent potencijala zemljišta ovdje najmanji.

6.3. Model uzemljivača s dva koncentrična prstena

Otpor rasprostiranja uzemljivača iznosi $R_e = 4,342 \Omega$. Duljina uzemljivača iznosi 105,9 m.



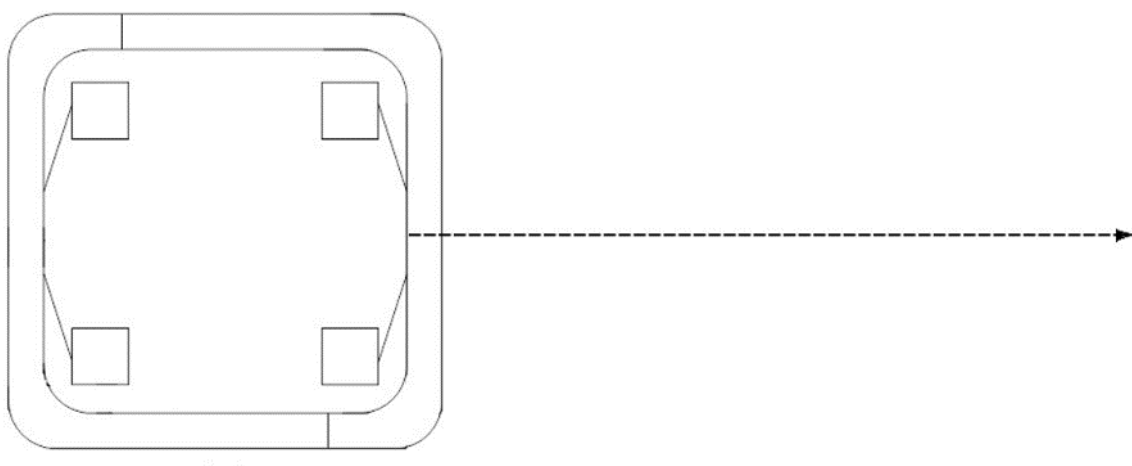
Slika 6.13. Prikaz dimenzija modela uzemljivača u obliku dvostrukog koncentričnog prstena



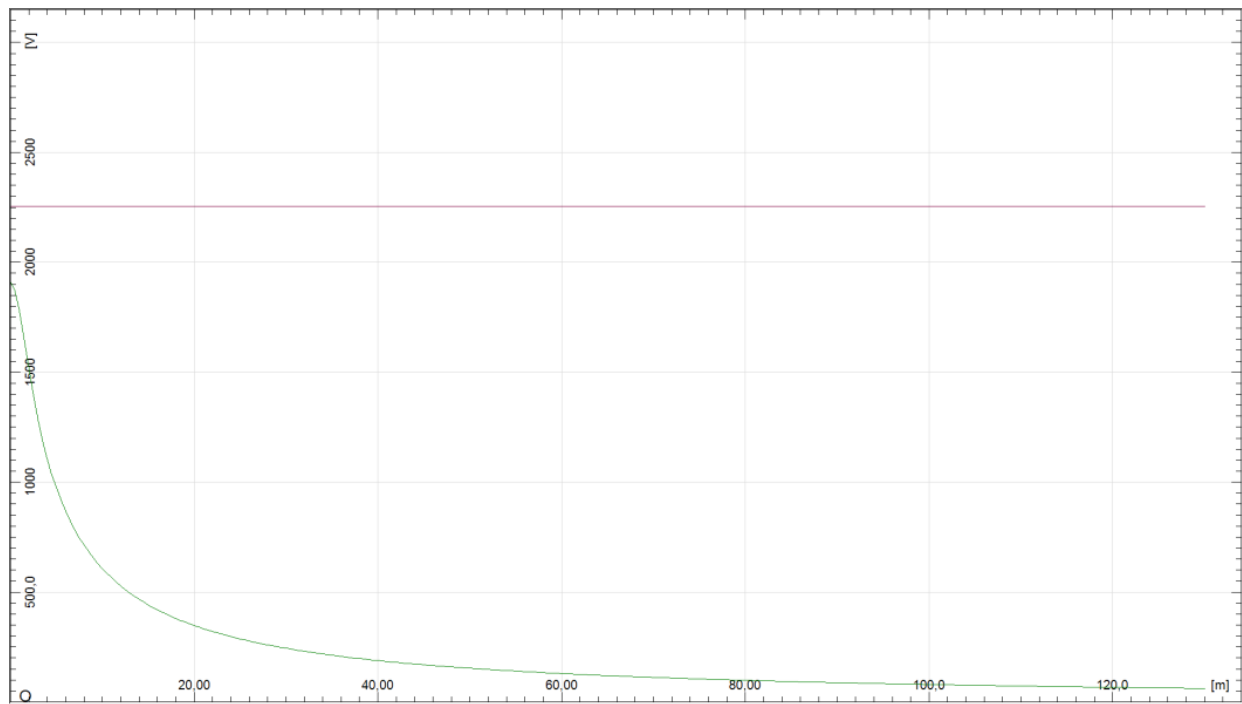
Slika 6.14 Dozvoljene vrijednosti napona dodira i napona koraka

Tablica 6.2. Dozvoljene vrijednosti napona dodira i napona koraka

tf	Rsh	Rgl	Utp	Usp	Ustp	Ussp	Ustp+SCL	Ussp+SCL
[s]	[Ω]	[Ω]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]	[V]
0,15	0,00	0,00	595,50	1786,50	700,97	3042,62	700,97	3042,62

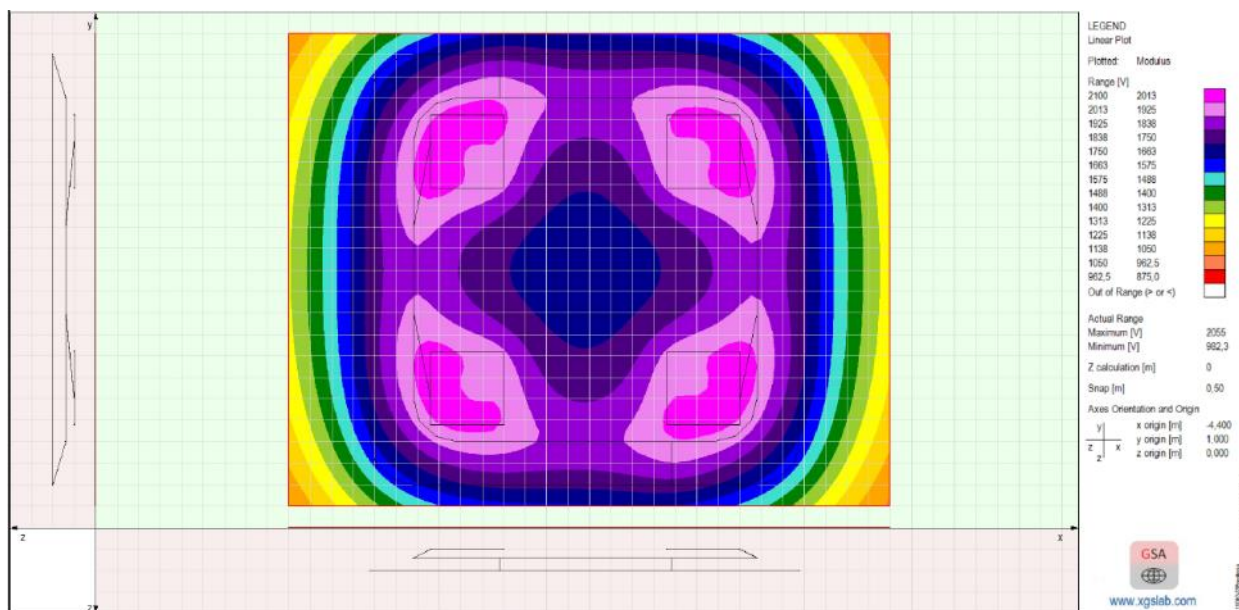


Slika 6.15. Prikaz smjera za izračun linijske raspodjele potencijala zemljišta

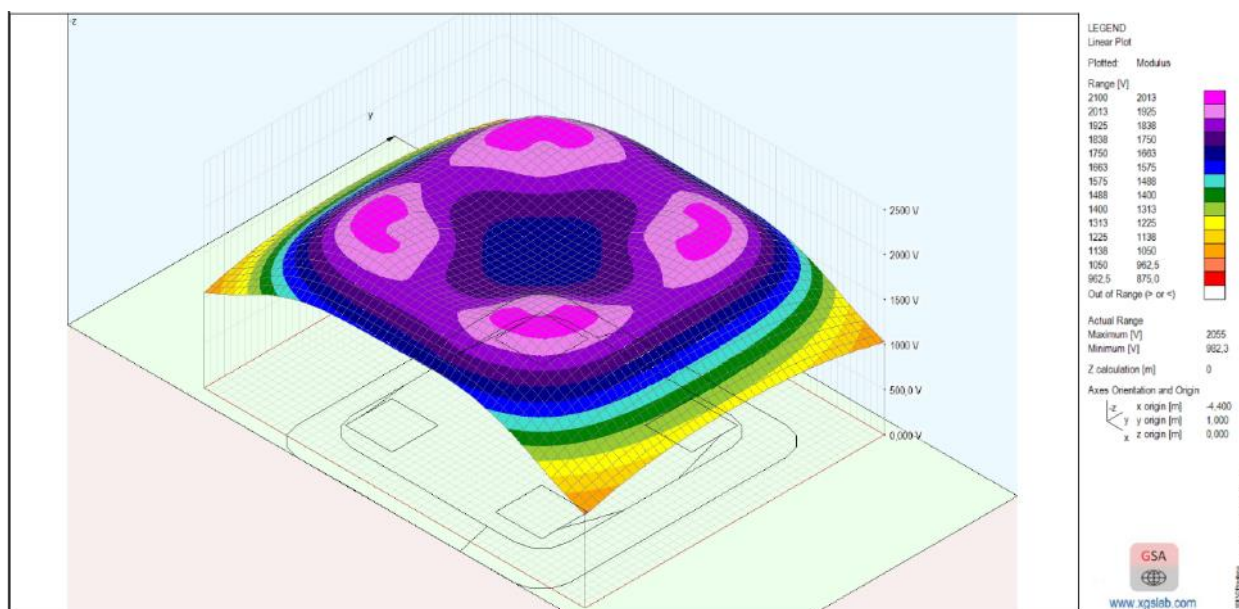


Slika 6.16. Linijski prikaz raspodjele potencijala zemljišta

Slika 6.16. prikazuje linijsku raspodjelu potencijala na kojoj se može vidjeti da je vrijednost najveća uz samu stupa. Najveća vrijednost iznosi 1800 V, a na udaljenosti 40 m od stupa ta vrijednost iznosi samo 10 %

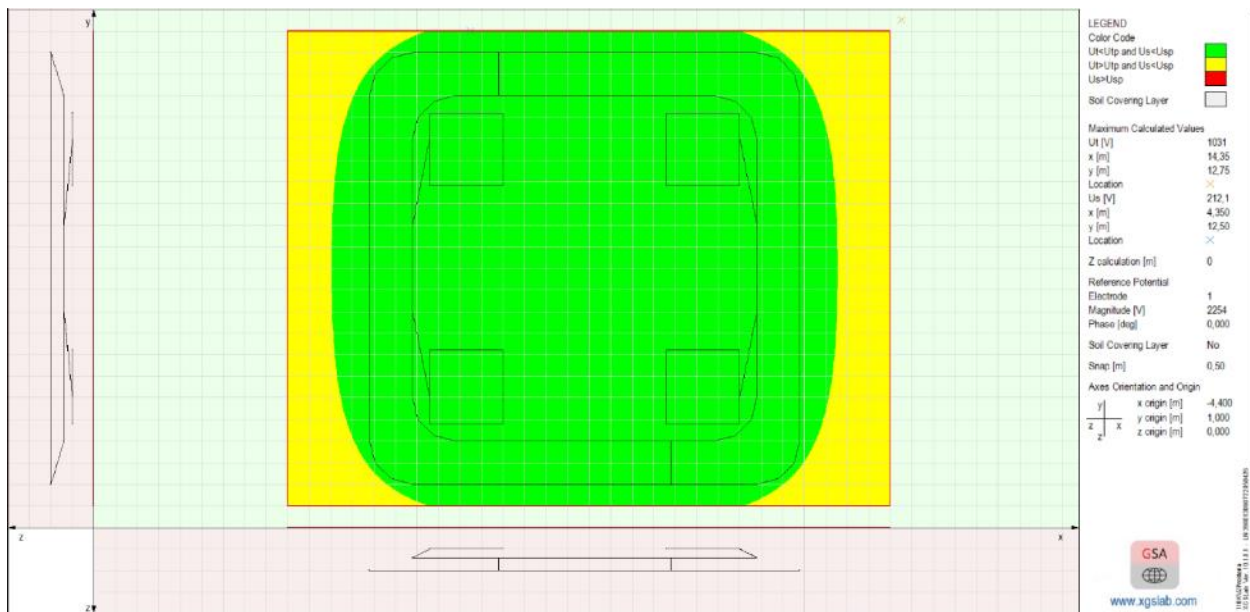


Slika 6.17. 2D – prikaz raspodjele potencijala zemljišta



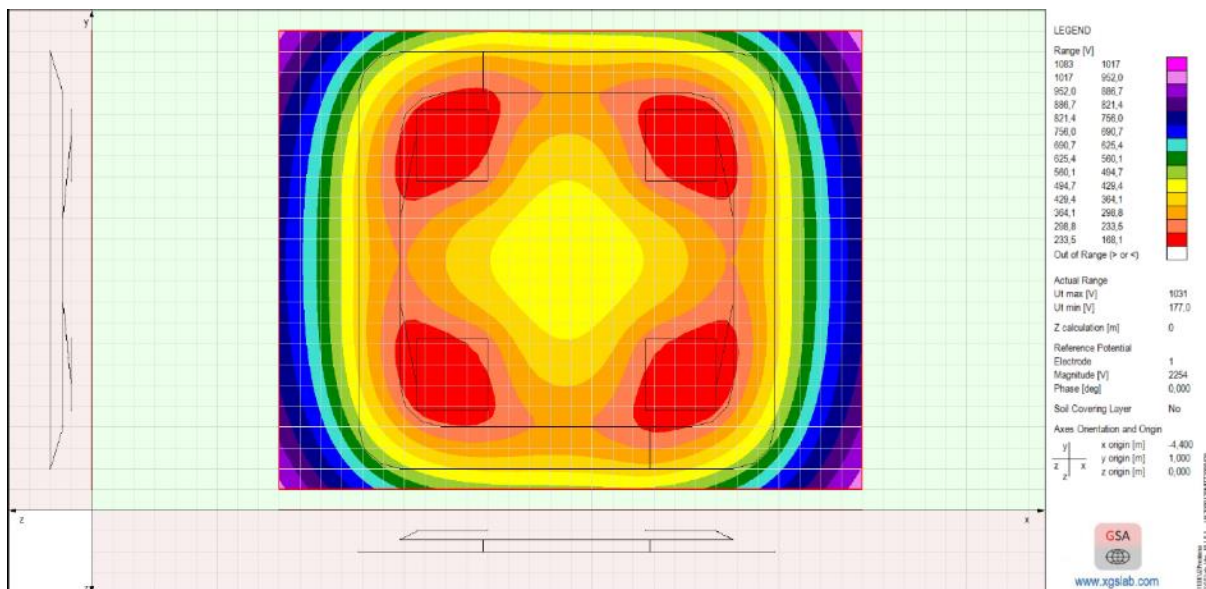
Slika 6.18. 3D – prikaz raspodjele potencijala zemljišta

Slike 6.17. i 6.18. prikazuju raspodjelu potencijala zemljišta za vrijeme trajanja kratkog spoja. Vršna vrijednost potencijala zemljišta iznosi 2100 V i ona se nalazi najbliže stupu odnosno oko temelja stupa. Udaljavanjem od stupa odnosno uzemljivača vrijednost potencijala se smanjuje i najniža vrijednost u analizom obuhvaćenom području iznosi 875 V.

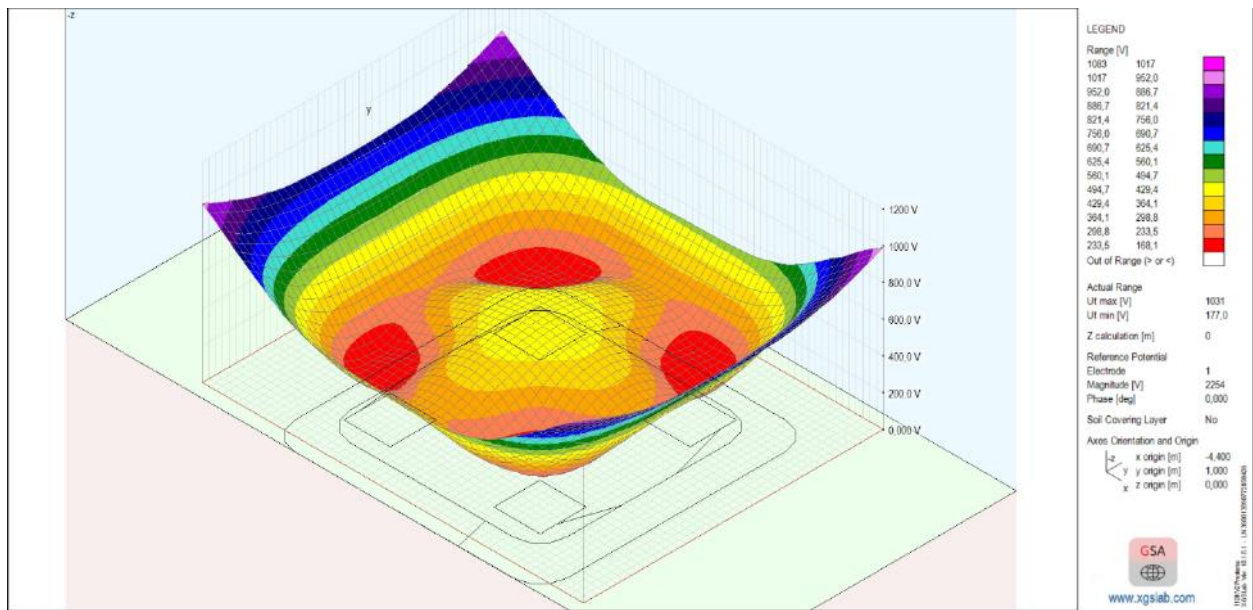


Slika 6.19. Prikaz sigurnih područja

Slika 6.19. prikazuje područja koja su sigurna za ljude i životinje u slučaju kratkog spoja. Zelenom bojom je označeno područje čije su vrijednosti napona dodira i napona koraka manje od dozvoljenih vrijednosti što znači da su ta područja sigurna za ljude i životinje. Žutom bojom je označeno područje u kojima je napon dodira veći od dozvoljene vrijednosti, ali zbog same udaljenosti metalnog dijela odnosno stupa ta područja su sigurna jer ljudi ni životinje ne mogu ostvariti fizički kontakt s metalnim dijelovima.

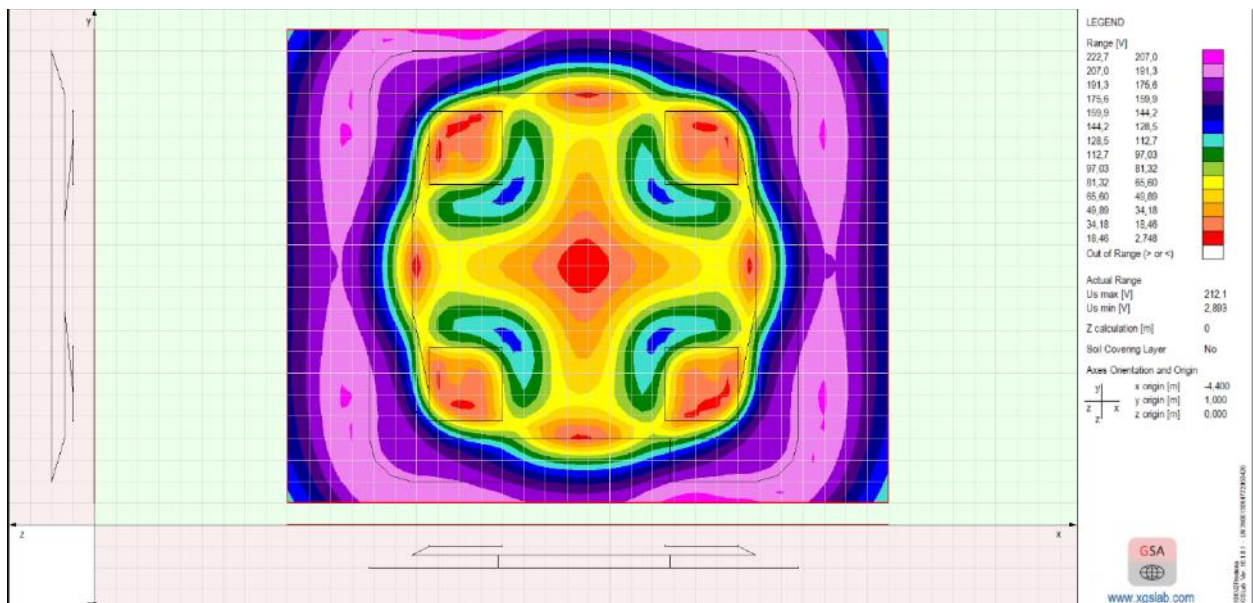


Slika 6.20. 2D – prikaz raspodjele napona dodira

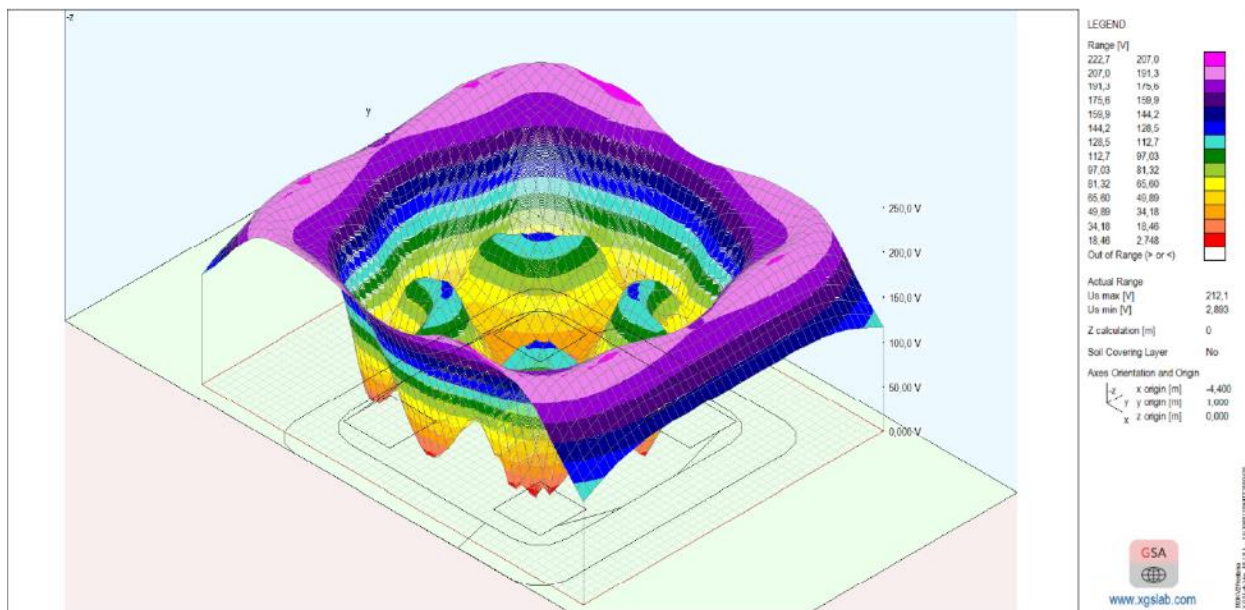


Slika 6.21. 3D – prikaz raspodjele napona dodira

Slike 6.20. i 6.21. prikazuju raspodjelu napona dodira za vrijeme trajanja kratkog spoja. Vršna vrijednost napona dodira iznosi 1083 V, a najmanja iznosi 168,1 V. Najmanja vrijednost napona dodira nalazi se u neposrednoj blizini stupa gdje i postoji mogućnost da se ostvari fizički kontakt s metalnom konstrukcijom odnosno stupom. Vrijednost napona dodira raste kako se udaljavamo od stupa ali tada više nije moguće ostvariti fizički kontakt s metalnom konstrukcijom pa nema opasnosti za živote ljudi i životinja.



Slika 6.22. 2D – prikaz raspodjele napona koraka



Slika 6.23. 3D – prikaz raspodjele napona koraka

Slike 6.22. i 6.23. prikazuju raspodjelu napona koraka za vrijeme trajanja kratkog spoja. Vršna vrijednost napona koraka iznosi 222,7 V, a najmanja vrijednost 2,7 V. Iz slika je vidljivo kako je najveća vrijednost napona koraka uz sami uzemljivač, a kako se udaljavamo od njega vrijednost opada. Tako je najniža vrijednost 2,7 V u samom središtu stupa jer je to područje gdje je gradijent potencijala zemljišta najmanji.

7. USPOREDBA IZMJERENIH VRIJEDNOSTI I ONIH DOBIVENIH ANALIZOM MODELA

Promotre li se vrijednosti otpora uzemljenja dobivenih za model uzemljivača u obliku jednog koncentričnog prstena i izmjerenih vrijednosti za stup broj 14 čije je uzemljenje izvedeno u obliku jednog koncentričnog prstena, može se primijetiti kako je razlika vrlo mala, tj. model jako dobro opisuje stvarni uzemljivač. Vrijednost otpora uzemljivača dobiven kao rezultat analize modela iznosi 6,663 Ω , a izmjerena vrijednost otpora uzemljivača stupa broj 14 iznosi 7,08 Ω . Slike 5.5. i 6.5. prikazuju linijsku raspodjelu potencijala, vršne vrijednosti dobivene u modelu i izmjerene vrijednosti odstupaju za 500 V što je bilo i za očekivati s obzirom da je izmjereni otpor bio veći od otpora dobivenog kao rezultat u modelu. Potencijal zemljišta dobiven u modelu ima vršnu vrijednost iznosa 2250 V, a izmjerena vrijednost potencijala zemljišta iznosi 2771 V. Može se primijetiti kako potencijal zemljišta dobiven modelom već na 40 m od stupa ima 10% vršne vrijednosti, dok potencijal zemljišta izmjeren na stupu pokazuje kako tek na 70 m od stupa broj 14 vrijednost potencijala zemljišta dostiže 10% vršne vrijednosti.

Promotre li se vrijednosti otpora uzemljenja dobivenih za model uzemljivača u obliku dva koncentrična prstena i izmjerenih vrijednosti za stup broj 20 čije je uzemljenje izvedeno u obliku dva koncentrična prstena, može se primijetiti razlika u iznosu od približno 1 Ω . Vrijednost otpora uzemljivača dobiven kao rezultat analize modela iznosi 4,342 Ω , a izmjerena vrijednost otpora uzemljivača stupa broj 20 iznosi 5,27 Ω . Slike 5.7. i 6.16. prikazuju linijsku raspodjelu potencijala, vršne vrijednosti dobivene u modelu i izmjerene vrijednosti odstupaju za 1700 V. Vršna vrijednost potencijala zemljišta dobivena u modelu iznosi 1900 V, a izmjerena vršna vrijednost potencijala zemljišta iznosi 3635 V. Može se primijetiti kako potencijal zemljišta dobiven modelom već na udaljenosti od 40 m od stupa dostiže 10% vršne vrijednosti, dok potencijal zemljišta izmjeren na stupu broj 20 pokazuje kako tek na 110 m od stupa vrijednost potencijala zemljišta dostiže 10% vršne vrijednosti.

Vrijednost otpora rasprostiranja uzemljivača ovisi o nekoliko čimbenika, uključujući:

- Vrsta tla – na nekoj lokaciji sastav tla može biti različit i time vrijednost otpora može biti veća ili manja.
- Vlažnost tla – vlažno tlo ima niži otpor jer voda povećava vodljivost tla.
- Temperatura tla.
- Korozija – korozija s vremenom može povećati otpor uzemljivača jer se smanjuje učinkovitost metalnog kontakta s tlom.

ZAKLJUČAK

U ovome radu odrađena je usporedba modela uzemljenja stupova dalekovoda sa stvarnim uzemljivačkim sustavima dalekovoda. Za izradu modela i simulaciju korišten je računalni program XGSLab. Cilj je bio odrediti vrijednosti otpora uzemljenja, raspodjelu potencijala te napon dodira i koraka. Simulacija je odrađena uz pretpostavku uniformnog modela tla specifičnog otpora u iznosu od $100 \Omega\text{m}$, očekivana vrijednost struje kratkog spoja na stupu iznosi 519 A. Simulacijom su dobivene vrijednosti otpora za oba modela, otpor modela uzemljivača u obliku jednostrukog koncentričnog prstena iznosi $6,663 \Omega$, a otpor uzemljivača izmjeren na stupu broj 14 iznosi $7,08 \Omega$. Otpor modela uzemljivača u obliku dva koncentrična prstena iznosi $4,342 \Omega$, a otpor uzemljivača izmjeren na stupu broj 20 iznosi $5,27 \Omega$. Vrijednosti otpora uzemljenja dobivene modelom i mjerenjem su ispod granice dozvoljene vrijednosti otpora koja iznosi $11,25 \Omega$ što znači da su uzemljivači ispravni. Također su dobivene i vrijednosti raspodjele potencijala u okolini stupa, vršne vrijednosti raspodjele potencijala modela iznosi 2625 V, a izmjerena vršna vrijednost potencijala iznosi 2771 V za uzemljivač s jednim prstenom. Za uzemljivač s dva prstena dobivena vrijednost raspodjele potencijala modela iznosi 2100 V, a izmjerena vrijednost raspodjele potencijala iznosi 3635 V. Linijska raspodjela potencijala zemljišta dobivena modelima prikazuje kako vrijednosti potencijala zemljišta padaju na 10% vršne vrijednosti kada smo udaljeni 40 m od stupa. Linijska raspodjela potencijala zemljišta izmjerena u okolini stupa prikazuje da će vrijednost potencijala zemljišta pasti na 10% tek kada se od stupa udaljimo 70 m u slučaju stupa s jednim prstenom te kada se udaljimo 110 m kada se radi o stupu s dva prstena. U oba modela okolina stupa je sigurna za ljude i životinje. Vrijednosti napona dodira dobivene u modelu za uzemljivač s jednim prstenom iznosi između 589 i 670 V, a izmjerena vrijednost napona dodira stupa broj 14 iznosi 17,8 V. Vrijednosti napona dodira dobivene u modelu za uzemljivač s dva prstena iznosi između 298 i 364 V, a izmjerena vrijednost napona dodira stupa broj 20 iznosi 18,13 V. Prilikom izračuna dozvoljenih vrijednosti napona dodira, program uzima u obzir površinski sloj, a prilikom određivanja napona dodira na modelu ne uzima u obzir. Vrijednosti napona dodira dobivene mjerenjima preračunate su na stvarnu struju kvara koja iznosi 10900 A. Vrijednosti napona dodira dobivene modelom su manje od dozvoljene vrijednosti koja iznosi 700 V za vrijeme trajanja kvara duljine 150 ms. Vrijednost napona dodira dan normom za vrijeme trajanja kvara duljine 150 ms iznosi 540 V što znači da su izmjerene vrijednosti također unutar dozvoljenih granica. Udaljavanjem od stupa vrijednost napona dodira raste, ali raste i udaljenost stoga je onemogućen kontakt s vodljivim dijelovima odnosno stupom. Prilikom određivanja vrijednosti

napona koraka površinska otpornost nije uzeta u obzir. Zbog toga nastaje značajno odstupanje između dozvoljenog napona koraka i dobivenih vrijednosti. Vrijednosti napona koraka su najveće u okolini uzemljivača gdje je gradijent potencijala zemljišta najveći i kreću se od 396 do 426 V za uzemljivač s jednim prstenom i od 207 do 222 V za uzemljivač s dva prstena, udaljavanjem od stupa vrijednost napona koraka pada. Uzemljivač s dva prstena ima znatno manje vrijednosti napona koraka u odnosu na uzemljivač s jednim prstenom budući da je raspodjela potencijala zemljišta ravnomjernija te je gradijent potencijala zemljišta manji.

LITERATURA

- [1] Franjo MAJDANDŽIĆ, *Uzemljivači i sustavi uzemljenja*, Zagreb, 2004.
- [2] Hrvoje POŽAR, *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, Zagreb, 1990.
- [3] I. Vučevac, "Uzemljivači", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2016. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:143290>
- [4] K. Jakopović, "Modeliranje i analiza sustava uzemljenja programskim paketom ANSYS", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2022. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:373461>
- [5] I. Neretljak, "ANALIZA METODA MJERENJA OTPORA UZEMLJENJA U DISTRIBUCIJSKOM EES", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2019. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:534593>
- [6] T. Jakobović, "Izračun impulsne impedancije uzemljivača", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2021. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:050203>
- [7] T. Leko, "Mjerenje otpora rasprostiranja uzemljenja", Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2019. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:913122>
- [8] M. Kvesić, "Modeliranje tla za potrebe izračuna otpora rasprostiranja uzemljivača", Završni rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2018. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:172708>
- [9] D. Kuric, "Analiza uzemljivačkog sustava visokonaponskog postrojenja", Diplomski rad, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, Osijek, 2021. Dostupno na: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:969826>

- [10] W. L. M., de Azevedo, A. R. J., de Araújo, J. S. L., Colqui, J. P., Filho, B., Kordi, „Transient analysis of power transmission towers above lossy ground with frequency dependent electrical parameters considering the water content of soil“, *E-Prime - Adv. Electr. Eng. Electron. Energy*, sv. 4, str. 100161, lip. 2023.
- [11] M., Ghomi, F., Faria da Silva, A. A., Shayegani Akmal, C., Leth Bak, „Transient overvoltage analysis in the medium voltage substations based on full-wave modeling of two-layer grounding system“, *Electr. Power Syst. Res.*, sv. 211, str. 108139, lis. 2022.
- [12] J., Trifunovic, M., Kostic, „Quick calculation of the grounding resistance of a typical 110 kV transmission line tower grounding system“, *Electr. Power Syst. Res.*, sv. 131, str. 178–186, velj. 2016.
- [13] Y., Xiaohua, Y., Jihe, Z., Xi, X., Rui, Z., Zhanlong, „Research on tower grounding resistance measurement methods by injecting multi-frequency current“, u *2017 First International Conference on Electronics Instrumentation & Information Systems (EIIS)*, str. 1–6, 2017.
- [14] Z., Xiang, X., Li, X., Chen, Q., Lv, C., Zhang, J., Ai, „Optimization Research on Grounding Resistance of Power Transmission Line Tower Foundation“, u *2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG)*, str. 82–86, 2019.
- [15] F., Zhenghua, L., Ling, F., Junzhong, „Research on reducing grounding resistance of transmission line tower grounding grid“, u *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, str. 1216–1219, 2011.
- [16] C., Wang, X., Liang, E. P., Adajar, P., Loewen, „Investigation of Seasonal Variations of Tower Footing Impedance in Transmission Line Grounding Systems“, *IEEE Trans. Ind. Appl.*, izd. 3, sv. 57, str. 2274–2284, svi. 2021.
- [17] *Hrvatska enciklopedija, mrežno izdanje*. Leksikografski zavod Miroslav Krleža, 2013. – 2024. Pristupljeno 2.5.2024. <https://www.enciklopedija.hr/clanak/dalekovod>
- [18] „Prijenosna mreža“ [online]. Dostupno na: <https://www.hops.hr/prijenosna-mreza>. [Pristupljeno: 2.5.2024.].
- [19] Marija OŽEGOVIĆ, Karlo OŽEGOVIĆ, *Električne energetske mreže I*, Split, 1996

- [20] J., He, R., Zeng, B., Zhang, *Methodology and Technology for Power System Grounding*, 1. izd. Wiley, 2012.
- [21] XGSLab Grounding Software and Electromagnetic Analysis Software Dostupno na: <https://www.xgslab.com/xgslab/general> [Pristupljeno: 18.5.2024]
- [22] Grounding System Analysis Dostupno na: <https://www.xgslab.com/xgslab/grounding-earthing/gsa> [Pristupljeno: 18.5.2024]
- [23] Hrvatska norma [HRN]. (2012) HRN EN 50522:2010 – Uzemljenje električnih postrojenja nazivnih izmjeničnih napona iznad 1kV
- [24] Končar institut za elektrotehniku, Izvještaj o ispitivanju odjel za kvalitetu električne energije, Stupovi zračnog DV 110 kV Valpovo – Kombinat „Belišće“, 2013.

SAŽETAK

Zadatak diplomskog rada bio je dati pregled konfiguracija sustava uzemljenja te u računalnom programu XGSLab izraditi model za izračun otpora uzemljivača različitih konfiguracija. U prvom dijelu rada opisano je uzemljenje, zaštitna užad te nadzemni vod odnosno dalekovod i njegovi dijelovi. U drugom dijelu rada iznose se podatci o trasi dalekovoda, broju stupova, vrsti vodiča i zaštitne užadi, opisani su mjerni postupci te su date vrijednosti raspodjele potencijala, napona dodira i otpora uzemljivača koje su dobivene mjerenjima. U trećem dijelu rada izrađeni su modeli uzemljenja u obliku jednostrukog i dvostrukog koncentričnog prstena te su dobivene vrijednosti raspodjele potencijala, napona dodira i koraka te vrijednost otpora uzemljivača. U četvrtom dijelu uspoređen je model iz trećeg dijela sa mjerenjima iz drugog dijela.

Ključne riječi: napon koraka, napon dodira, raspodjela potencijala, uzemljenje, XGSLab

ABSTRACT

The objective of the master thesis was to provide an overview of grounding system configurations and to create a model in the XGSLab software for calculating the grounding resistance of different configurations. The first part of the thesis describes grounding, ground conductors, overhead lines, and their components. The second part presents data on the transmission line route, the number of towers, the type of conductors and protective conductors, describes the measurement procedures, and provides the values of potential distribution, touch voltage, and grounding resistance obtained from measurements. In the third part of the thesis, grounding models in the form of single and double concentric rings were created, and the values of potential distribution, touch and step voltages, and grounding resistance were obtained. In the fourth part, the model from the third part is compared with the measurements from the second part.

Keywords: step voltage, touch voltage, potential distribution, grounding, XGSLab

ŽIVOTOPIS

Ante Janković rođen je u Osijeku 21. prosinca 1999. godine. Živi i odrasta u Belišću te pohađa Osnovnu školu Ivana Kukuljevića, Belišće. Nakon završene osnovne škole upisuje Srednju školu Valpovo, zanimanje elektrotehničar. Završetkom srednje škole započinje raditi u TEO-Belišće d.o.o. - Tvornica elektro opreme u Belišću. Nakon godinu dana rada upisuje Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, Preddiplomski sveučilišni studij elektrotehnike, smjer elektroenergetika. Preddiplomski studij završava 2022. godine te stječe naziv univ.bacc.ing. te upisuje Diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok Elektroenergetski sustavi.