# Analiza uzemljivačkog sustava visokonaponskog postrojenja

**Kuric, Dominik**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*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://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:969826

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-23**

*Repository / Repozitorij:*

Faculty of Electrical Engineering, Computer Science and Information Technology Osijek

**SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKUFAKULTET ELEKTROTEHNIKE, RAČUNARSTVA I INFORMACIJSKIH TEHNOLOGIJA**

**Sveučilišni diplomski studij**

# ANALIZA UZEMLJIVAČKOG SUSTAVA VISOKONAPONSKOG POSTROJENJA

**Diplomski rad**

**Dominik Kuric**

**Osijek, 2021.**

**Sadržaj**

1. UVOD ..... 1
1.1. Zadatak diplomskog rada ..... 1
2. PREGLED LITERATURE ..... 2
3. OPĆENITO O UZEMLJENJU ..... 3
3.1. Pojam uzemljenja i uzemljivača ..... 3
3.2. Uloga uzemljenja ..... 4
3.3. Otpor uzemljenja ..... 5
3.4. Podjela uzemljivača ..... 6
3.5. Vrste uzemljenja prema namjeni ..... 7
3.5.1. Pogonsko (radno) uzemljenje ..... 7
3.5.2. Zaštitno uzemljenje ..... 8
3.5.3. Gromobransko uzemljenje ..... 8
3.5.4. Združeno uzemljenje ..... 9
4. RAZDIOBA POTENCIJALA, NAPONI DODIRA I KORAKA ..... 10
4.1. Napon dodira ..... 11
4.2. Napon koraka ..... 12
4.3. Oblikovanje potencijalnog lijevka ..... 13
4.4. Iznošenje potencijala ..... 14
4.5. Zaštita od strujnog udara ..... 15
4.5.1. Utjecaj struje na tijelo ..... 17
5. MJERENJE OTPORA UZEMLJENJA VISOKONAPONSKOG POSTROJENJA ..... 19
5.1. Mjerenje napona dodira i napona koraka ..... 20
5.2. Uklanjanje utjecaja smetnji ..... 21
6. SIMULACIJA I ANALIZA SUSTAVA UZEMLJENJA VISOKONAPONSKOG POSTROJENJA ..... 22
6.1. Tehnički opis postrojenja ..... 22
6.1.1. Opis tla ..... 22
6.1.2. Opis uzemljivača ..... 23
6.1.3. Proračuni ..... 23
6.2. Rad u XGSLabu ..... 24
6.2.1. Slučaj dvoslojnog modela tla ..... 25
6.2.1.1 Galvanski odvojena ograda u slučaju dvoslojnog modela tla ..... 27
6.2.1.2. Galvanski spojena ograda u slučaju dvoslojnog modela tla ..... 33
6.2.2. Slučaj jednoslojnog modela tla ..... 38
6.2.2.1. Galvanski odvojena ograda u slučaju jednoslojnog modela tla ..... 39
6.2.2.2. Galvanski spojena ograda u slučaju jedno slojnog modela tla ..... 45
ZAKLJUČAK ..... 50

LITERATURA ..... 51
SAŽETAK ..... 52
ABSTRACT ..... 53
ŽIVOTOPIS ..... 54

# 1. UVOD

U ovom diplomskom radu objašnjen je način mjerenja otpora uzemljenja visokonaponskog postrojenja, naponi dodira i koraka u problematičnim područjima postrojenja, analiza uzemljivačkog sustava postrojenja te potencijal ograde postrojenja uz pripadajuće napone dodira i koraka.

U prvom poglavlju teorijski su obrađeni pojmovi uzemljenja, uzemljivača i zemljovoda. Objašnjena je njihova svrha izvođenja te su objašnjeni pojmovi otpora uzemljenja, otpora rasprostiranja, podjela uzemljenja i uzemljivača prema njihovim svojstvima.

U drugom poglavlju opisani su pojmovi razdiobe potencijala, napona dodira i koraka. Opisano je nekoliko primjera koji se susreću u praksi, te su objašnjeni pojmovi iznošenja potencijala i oblikovanje potencijalnog lijevka. Pojašnjena je zaštita od strujnog udara, sigurnost u područjima rada s naponom i utjecaj struje na tijelo.

U trećem poglavlju je objašnjena metoda mjerenje otpora uzemljenja visokonaponskog postrojenja, mjerenje dodirnog napona i napona koraka te uklanjanje utjecaja smetnji na mjerenje.

U zadnjem poglavlju provedena je simulacija i analiza uzemljivačkog sustava visokonaponskog postrojenja. Prikazani su naponi dodira i koraka, potencijal zemljišta te potencijal ograde postrojenja uz pripadajuće napone dodira i koraka u blizini ograde.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

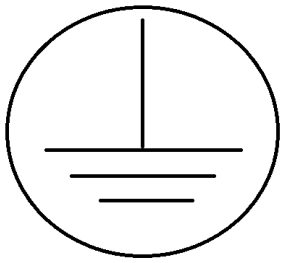
U diplomskom radu potrebno je objasniti mjerenje otpora uzemljenja visokonaponskog postrojenja. Uz to potrebno je definirati moguća problematična područja u postrojenju vezano za očekivane vrijednosti napona dodira i koraka. Nadalje, potrebno je izraditi računalni model uzemljivačkog sustava trafostanice te provesti analizu uzemljivačkog sustava, odrediti otpor rasprostiranja, napone dodira i koraka u postrojenju. Također, potrebno je odrediti potencijal ograde postrojenja te napone dodira i koraka u blizini ograde.

# 2. PREGLED LITERATURE

Literatura [1] i [2] opisuju osnovne pojmove o kojima je bilo govora kao što su otpor rasprostiranja, uzemljenje, podjela uzemljivača, svrha uzemljenja te su preuzeti prikazi i slike nužni za teorijsku obradu teme. Literatura [3] govori o načinu zaštite od električnog udara u postrojenjima. Literatura [4] prikazuje potencijalnu razdiobu oko ukopanog uzemljivača i ekvipotencijalne plohe. Literatura [5] opisuje uzemljivanje vanjskog visokonaponskog postrojenja. Literatura [6] opisuje način rada u programskom alatu XGSLab odnosno osnovne upute za korištenje osnovnih operacija, prikaza i simulacija u XGSLab-u. U literaturi [7] se nalazi opisani način održavanja uzemljivača u visokonaponskim postrojenjima. U literaturi [8] je opisan programski alat XGSLab i njegove mogućnosti. U literaturi [9] se može naći prikaz zemljovoda opisanog u ovom radu. Literatura [10] sadrži prikaz prolaska struje kroz sustav uzemljenja. Unutar literature [11] dostupan je sadržaj o zaštiti na radu u neposrednoj blizini rukovanja s električnom energijom kao što su zakoni i propisi koji se moraju poštovati za sigurnost ljudi te opće poznatih pet pravila sigurnosti. U literaturi [12] je opisan izvedbeni projekt promatranog visokonaponskog postrojenja.

# 3. OPĆENITO O UZEMLJENJU

Svaki uređaj ili konstrukcija s metalnim dijelovima koji mogu doći pod napon u slučaju kvara, predstavljaju opasnost za sva živa bića koja mogu doći u kontakt s tim uređajem ili konstrukcijom te se iz tog razloga uređaj uzemljuje posredstvom zemljovoda na uzemljivač. Opasnost za živa bića i imovinu u slučaju kvara je veća s povećanjem napona u gledanom radnom okruženju, a to je pogotovo izraženo u visokonaponskim rasklopnim postrojenjima kojima će se u ovom radu obratiti posebna pozornost.



Slika 3.1. Simbol za uzemljenje u elektrotehnici

## 3.1. Pojam uzemljenja i uzemljivača

Prema literaturi [2] "Uzemljenje je galvanski spoj između metalnog, uzemljenog dijela elektroničkog uređaja, postrojenja ili neke točke mreže koja iz bilo kojeg razloga može biti pod naponom i zemlje pomoću uzemljivača. Uzemljivači su metalni dijelovi koji se nalaze u zemlji i ostvaruju električni vodljivi spoj uzemljenih dijelova sa zemljom. Uz uzemljivač, kao glavni dio uzemljenja, bitan je i zemljovod čiji je zadatak povezati metalne dijelove postrojenja koji se uzemljuju s uzemljivačem."

Slika 3.2. Tipični štapni uzemljivač ukopan u tlu [9]

Na slici (Slika 3.2.) se vidi spoj između uzemljene metalne konstrukcije(sivo) i štapnog uzemljivača (smeđe-narančasto) posredstvom zemljovoda (bakrene žice) koja je zaštićena izolacijskim plastičnim materijalom (PVC) karakterističnih boja za uzemljenje u elektrotehnici (žuto-zelena boja).

## 3.2. Uloga uzemljenja

Kako je opisano u literaturi [2], uzemljenje se izvodi iz sljedećih razloga:

a) osigurati sigurnost živih bića (u prvom redu ljudi) za vrijeme normalnog ili poremećenog stanja električnog sustava

b) osigurati sigurnost ljudi s obzirom na napone koji se u uzemljivačkim sustavima javljaju pri najvećim strujama jednofaznog kratkog spoja

c) osigurati ispravan rad električnih uređaja, postrojenja, mreža i instalacija

d) stabilizirati napon za vrijeme prijelaznog stanja i time smanji mogućnost nastanka kvarova za vrijeme tog stanja

## 3.3. Otpor uzemljenja

Otpor uzemljenja se računa kao suma otpora rasprostiranja i otpora zemljovoda prema izrazu (3-1) [1]:

$$Rz = Rr + Rzv \tag{3-1}$$

gdje su:

Rz - otpor uzemljenja [Ω]

Rr - otpor rasprostiranja [Ω]

Rzv- otpor zemljovoda [Ω]

"Pod otporom rasprostiranja Rr podrazumijeva se otpor koji prolasku struje pruža onaj dio zemlje koji se nalazi između uzemljivača i zone u kojoj se struja širi kroz toliki presjek tla da njezina gustoća postaje vrlo mala. Slojevi zemlje izvan te granice, u električnom se smislu nazivaju neutralna zemlja, daleka zemlja ili referentna zemlja. Može se pojednostavljeno reći da je otpor rasprostiranja Rr uzemljivača otpor između uzemljivača i neutralne zemlje" kako je opisano u literaturi [1].

Otpor rasprostiranja i otpor uzemljenja se mogu poistovjetiti jer je otpor zemljovoda zanemarivo male vrijednosti te je lakše za praktičnu uporabu, dakle $Rz \approx$ Rr [2].

U literaturi [2] je opisana usporedba specifičnih otpora kako slijedi "uspoređujući specifični otpor zemlje relativno dobre vodljivosti $\rho_z$= 100 $\Omega m$ sa specifičnim otporom željeza $\rho_{Fe}$(od kojeg se prave trakasti, pločasti i štapni uzemljivači) dobivamo omjer prema izrazu" (3-2) :

$$\frac{\rho_z}{\rho_{Fe}} = \frac{100}{10 \times 10^{-8}} = 1 \times 10^9 \tag{3-2}$$

"što znači da je specifični otpor zemlje milijardu puta veći od specifičnog otpora čelika, te se otpor zemljovoda može uvijek zanemariti. Za bakrene uzemljivače taj je omjer još povoljniji. Ispitivanjem uzemljivača i sustava uzemljenja mjeri se otpor uzemljenja, a ne otpor rasprostiranja. S druge strane, proračunom otpora uzemljenja utvrđuje se otpor rasprostiranja Rr, a ne otpor uzemljenja Rz."

Otpor uzemljenja se računa prema izrazu (3-3) [1]:

$$Rz = \frac{Uz}{Iz} \tag{3-3}$$

gdje su:

Rz - otpor uzemljenja [Ω]

Uz - napon između uzemljivača i referentne zemlje [V]

Iz - struja koja prolazi kroz uzemljivač u zemlju [A]

## 3.4. Podjela uzemljivača

Uzemljivači se mogu podijeliti prema materijalu od kojih su napravljeni, prema obliku izvedbe njihove konstrukcije unutar zemlje, prema sredini u koju se polažu i prema načinu na koji se postavljaju.

Prema materijalu dijelimo ih na:

- bakrene (s ili bez vanjskog sloja cinka, olova ili kositra)
- pocinčane
- kombinacija bakrenih i pocinčanih [2].

Prema obliku izvedbe:

- trakasti uzemljivač
- štapni uzemljivač
- mrežni uzemljivač
- pločasti uzemljivač
- polukuglasti uzemljivač
- prstenasti uzemljivač
- sastavljeni uzemljivač [2].

Prema sredini u koju se polažu:

- uzemljivači u tlu
- temeljni uzemljivači [2].

Prema načinu postavljanja:

- horizontalni (površinski)
- vertikalni (dubinski)
- kosi [2].

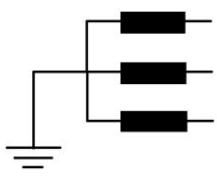
## 3.5 Vrste uzemljenja prema namjeni

Uzemljenja možemo podijeliti na četiri osnovne vrste prema njihovoj namjeni koju imaju u pogonu:

- pogonsko ili radno uzemljenje
- zaštitno uzemljenje
- gromobransko uzemljenje
- združeno uzemljenje [1].

### 3.5.1. Pogonsko(radno) uzemljenje

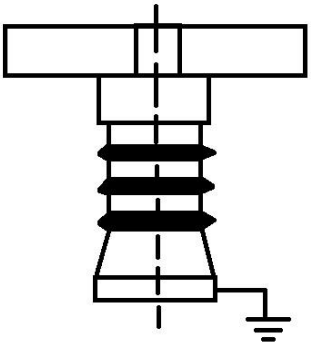
Prema literaturi [1] "Pogonsko uzemljenje karakterizirano je time da je na zemlju spojena točka postrojenja koja pripada strujnom krugu pa je na taj način sam strujni krug galvanski spojen sa zemljom. Na slici (Slika 3.2.) prikazano je uzemljenje nultočke preko transformatora kao najčešće pogonsko ili radno uzemljenje."



Slika 3.3. Pogonsko uzemljenje zvjezdišta transformatora

### 3.5.2. Zaštitno uzemljenje

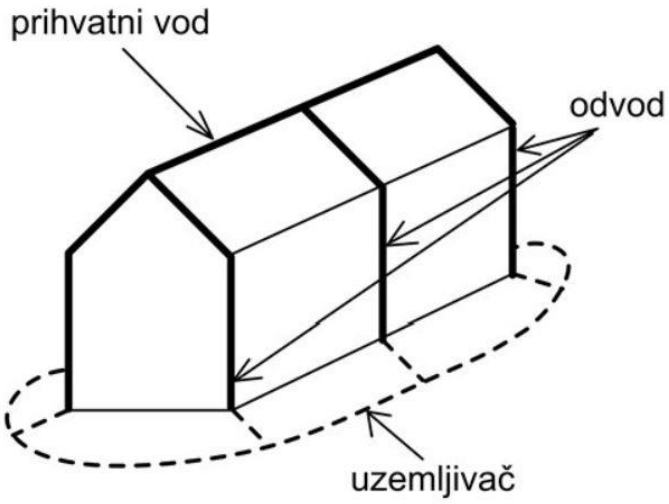
Prema literaturi [1] "zaštitno uzemljenje karakterizirano je time što je sa zemljom spojena točka postrojenja koja ne pripada strujnom krugu i koja ne smije doći u galvansku vezu sa strujnim krugom, ali ne može se izbjeći da do takve veze dođe zbog kvara na izolaciji."



Slika 3.4. Zaštitno uzemljenje konstrukcijskih dijelova [1]

### 3.5.3. Gromobransko uzemljenje

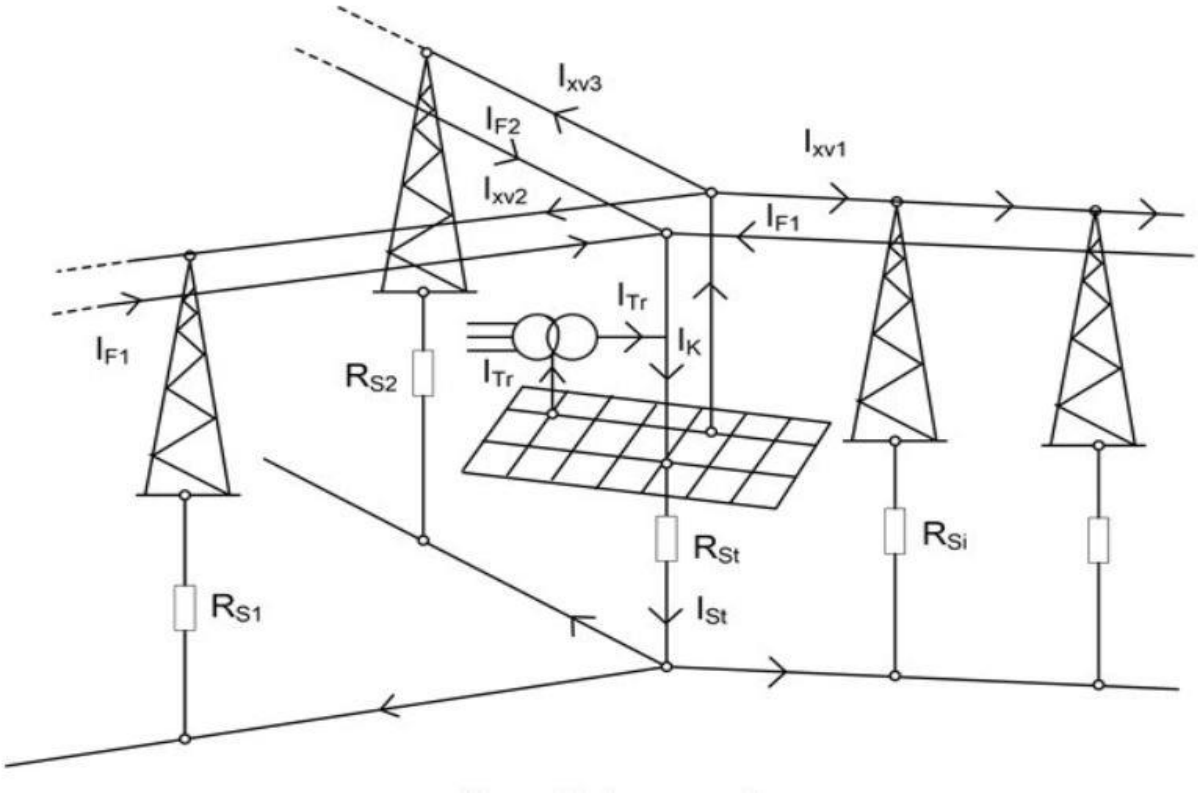
Prema literaturi [1] "Gromobransko uzemljenje služi za odvod struje munje u zemlju, tj. struje prouzrokovane atmosferskim pražnjenjima, spajajući gromobransku instalaciju s gromobranskim uzemljivačem. Gromobransko uzemljenje može biti odvojeno ili zajedničko sa zaštitnim i pogonskim uzemljenjem. Gromobransko uzemljenje treba dimenzionirati za uvjete impulsne struje munje, pa se zbog toga naziva i impulsni uzemljivač."




Slika 3.5. Gromobransko uzemljenje [1]

### 3.5.4. Združeno uzemljenje

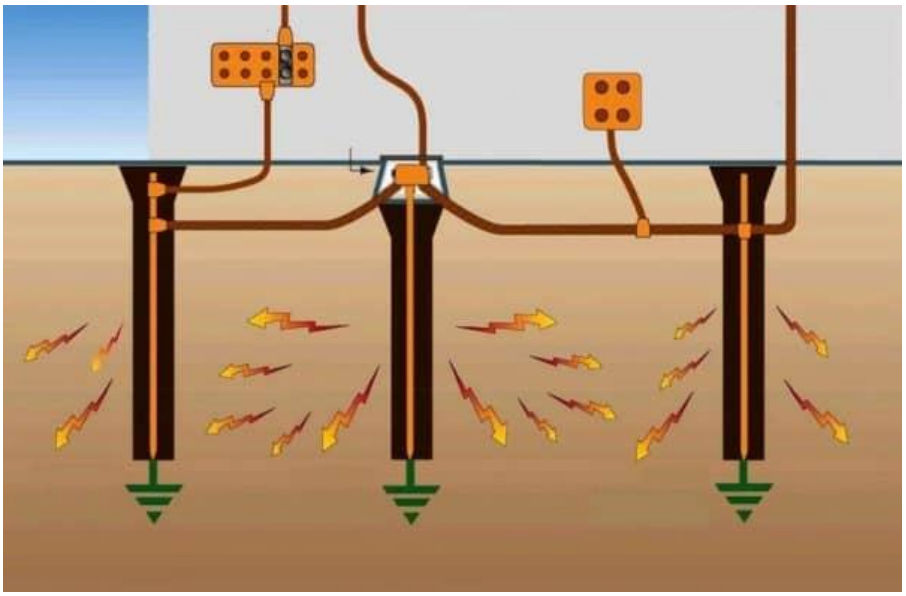
"Združeno uzemljenje spajanje je dvaju ili više različitih vrsta uzemljenja na jedan uzemljivač, na primjer pogonskog i zaštitnog uzemljenja ili pogonskoga zaštitnog i gromobranskog uzemljenja, te zbog toga združeno uzemljenje mora zadovoljiti uvjete svih vrsta uzemljenja koja se spajaju zajedno" kako je opisano u literaturi [1].




Slika 3.6. Združeno uzemljenje [1]

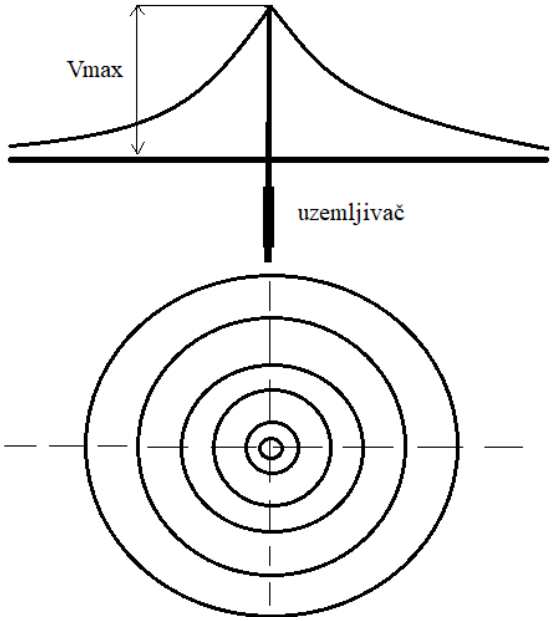
# 4. RAZDIOBA POTENCIJALA, NAPONI DODIRA I KORAKA

U trenutku kada struja počne prolaziti uzemljenim dijelovima uređaja ili uzemljenim dijelovima konstrukcija, struja će tražiti liniju manjeg otpora da bi zatvorila strujni krug te će preko zemljovoda strujati kroz uzemljivač i na kraju u zemlju gdje će se "trošiti". Kako će se cijeli proces prolaska struje odvijati ovisi o više parametara kao što su napon, korišteni materijali, vrsta uzemljivača, vrsta sredine u koju se polaže uzemljivač, vlaga, otpor rasprostiranja itd. Na slici (Slika 4.1.) vidljiv je sustav uzemljenja kroz koji je potekla struja te se vidi kako struja prodire kroz slojeve zemlje u svim smjerovima.



Slika 4.1. Prolazak struje kroz sustav uzemljenja [10]

"Ukupni otpor rasprostiranja prolasku struje od uzemljivača kroz zemlju jednak je zbroju otpora pojedinih slojeva tla koje okružuje uzemljivač. Slojevi tla bliže uzemljivaču pružaju struji veći otpor od onih udaljenih (zbog manjeg presjeka). Zbog toga prvi slojevi troše veći dio ukupnog napona od onih koji su udaljeniji od uzemljivača . Potencijal je to manji što je udaljenost od uzemljivača veća." kako je opisano u literaturi [2].



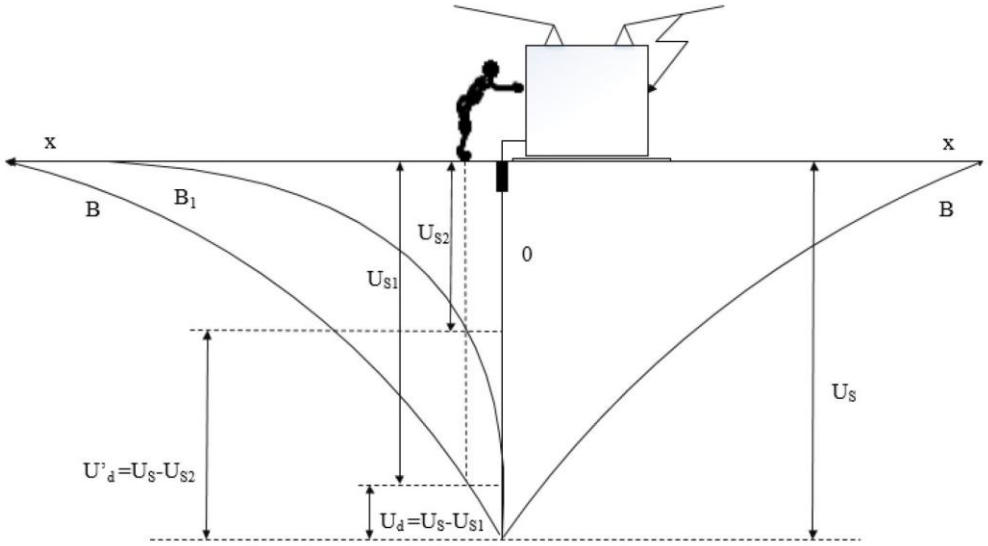

Slika 4.2. Potencijal zemlje i ekvipotencijalne linije oko štapnog uzemljivača

Kod konstrukcije uzemljivača, pogotovo u visokonaponskim i srednjenaponskimpostrojenjima, pred projektante i inženjere se postavljazahtjev da uzemljivač bude izveden na način da gradijent raspodjele potencijala unutar i oko postrojenja bude što manji jer se time povećava sigurnost ljudi i smanjuje rizik od opasnih razina napona dodira i koraka.

U literaturi [1] je navedeno da "veličina napona koraka i dodirnog napona ovisi o iznosu struje koja teče kroz zemlju, zatim o otporu uzemljenja i krivulji raspodjele potencijala. Dodirni napon i napon koraka koji su opasni za čovjeka, mogu se svesti na neopasnu vrijednost ako se smanji otpor uzemljenja i tako ostvari manje strma raspodjela potencijala. Međutim, to nije uvijek lako postići. Taj otpor ne ovisi samo o obliku, dimenzijama i broju uzemljivača, nego znatno i o strukturi zemljišta, tj. o otpornosti zemljišta u koje su uzemljivači ukopani."

## 4.1. Napon dodira

"Dodirni napon je razlika potencijala između napona uzemljivača kroz koji teče struja (pri poremećaju sustava) i napona na kojem je osoba koja je dodirnula uzemljenu strukturu. Ta razlika potencijala može se predstaviti kao funkcija udaljenosti od uzemljivača te se napon dodira definira na udaljenosti od 1m" kako je definirano u literaturi [2].




Slika 4.3. Dodirni napon i raspodjela potencijala oko uzemljivača [1]

Na slici (Slika 4.3.) se vidi čovjek koji rukom dira uzemljeni uređaj kroz čiji sustav uzemljenja teče struja. U slučaju kada se gleda krivulja B raspodjele potencijala, dodirni napon $U_d$ na kojemu se čovjek nalazi računa se prema izrazu (4-1):

$$U_d = U_s - U_{s1} \tag{4-1}$$

U slučaju kada se gleda krivulja raspodjele potencijala $B_1$, dodirni napon $U'_d$ na kojemu se čovjek nalazi računa se prema izrazu (4-2):

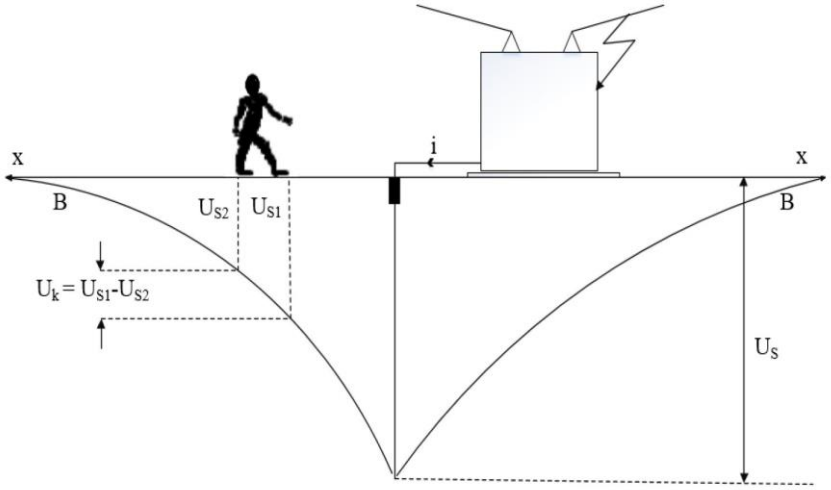
$$U'_d = U_s - U_{s2} \tag{4-2}$$

U promatranim slučajevima se vidi da je krivulja $B_1$ strmija od krivulje B što znači da je veći gradijent promjene potencijala iz čega slijedi da će i napon dodira biti većite će predstavljati veću opasnost za čovjeka.

## 4.2. Napon koraka

"Napon koraka je razlika potencijala između stopala kada osoba ili živo biće hoda po površini zemlje gdje postoji razdioba potencijala. Napon koraka ovisi o duljini koraka  te se definira razmakom između stopala od 1m" kako je definirano u literaturi [2].

"Uz čovjeka u definiciji namjerno je navedeno živo biće jer se u praksi susreću problemi zaštite živih bića(najčešće četveronožaca, divljači, konja, goveda i sl.) koji stradavaju zbog napona koraka prvenstveno jer zbog većeg razmaka nogu dolaze pod veći napon koraka od čovjeka"prema literaturi [2].




Slika 4.4. Napon koraka i raspodjela potencijala oko uzemljivača [1]

Na slici (Slika 4.4.) vidi se čovjek koji hoda po površini gdje postoji raspodjela potencijala prema krivulji B. Napon koraka $U_k$ na kojemu se čovjek nalazi računa se prema izrazu (4-3):

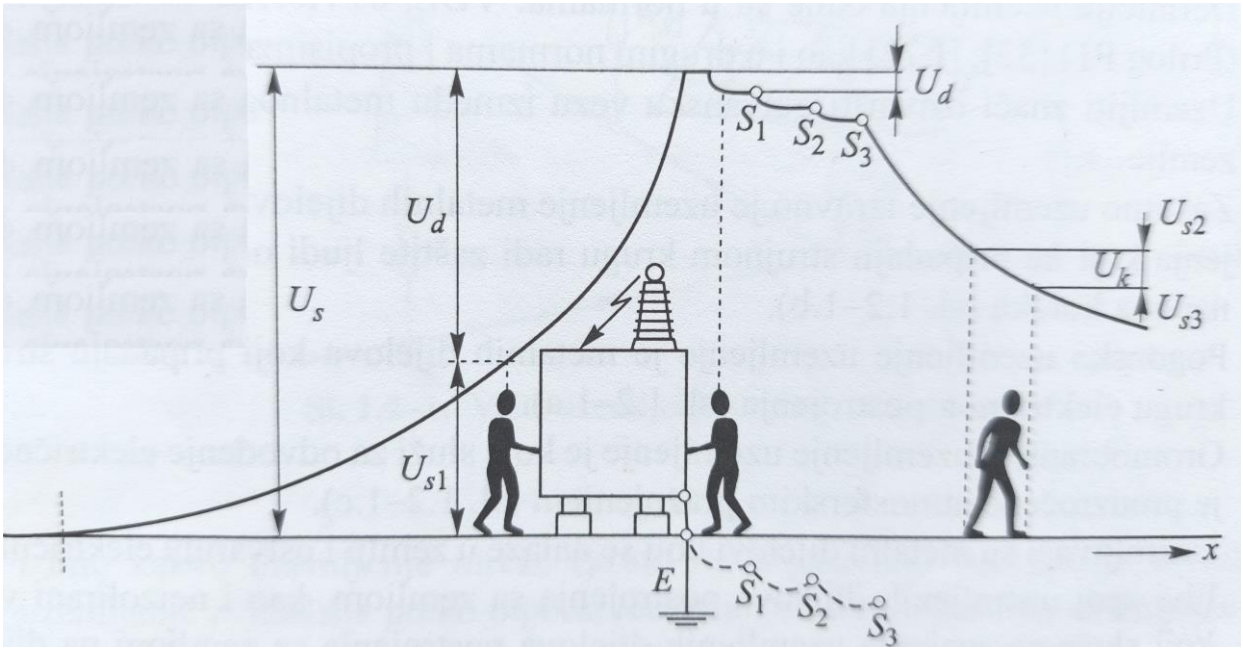
$$U_k = U_{S1} - U_{S2} \tag{4-3}$$

Promatranjem krivulje B vidi se povećanje gradijenta raspodjele potencijala što je čovjek bliže uzemljivaču. Iz toga se da zaključiti da je opasnost veća što je čovjek bliže uzemljivaču, odnosno napon koraka će biti veći.

## 4.3. Oblikovanje potencijalnog lijevka

U slučaju postojanja opasnih područja izvan postrojenja ili unutar postrojenja gdje je veliki gradijent razdiobe potencijala, jedno od mogućih rješenja je oblikovanje potencijalnog lijevka.

U literaturi [1] je navedeno da "ravnomjernije izjednačavanje potencijala postupak je pri izradi uzemljenja, kojim se postiže razdioba napona oko uzemljivača radi smanjenja dodirnog napona $U_d$i napona koraka $U_K$".

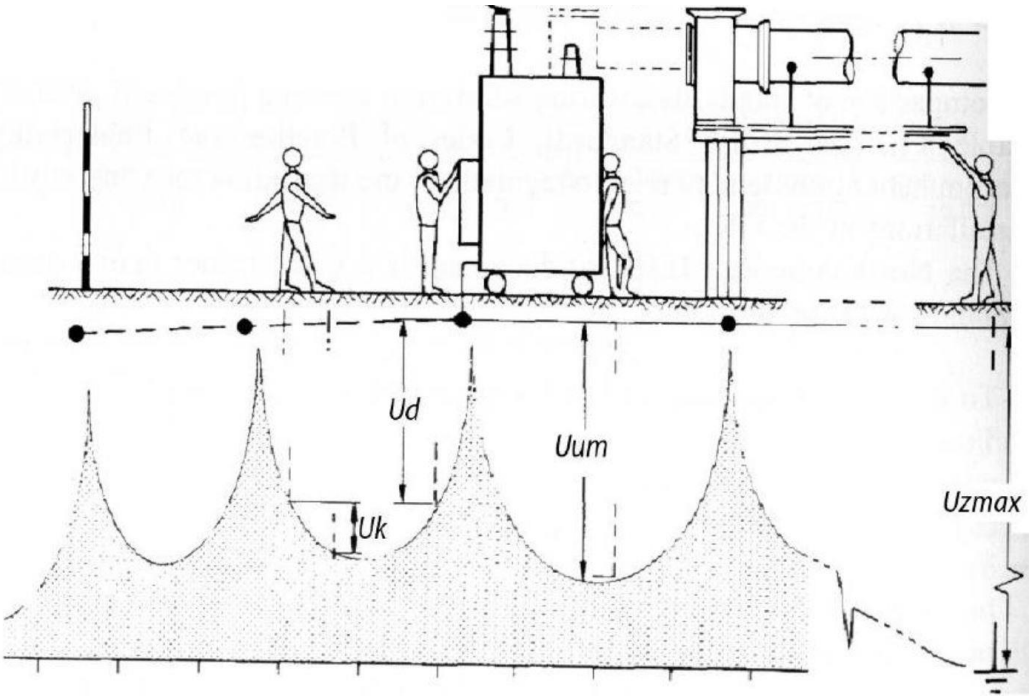



Slika 4.5. Oblikovanje potencijalnog lijevka [1]

Na slici (Slika 4.5.) vidimo razdiobu potencijala uzemljivača. Lijeva krivulja predstavlja normalnu razdiobu potencijala, a desna krivulja u dijelu $S_1, S_2, S_3$ predstavlja oblikovanje potencijalnog lijevka što vidno smanjuje gradijent raspodjele potencijala i time smanjuje opasnost od visokog napona dodira, odnosno napona koraka.

## 4.4. Iznošenje potencijala

Prema literaturi [2] "Kako u slučaju kvara na visokonaponskim postrojenjima s izravno uzemljenim zvjezdištima potencijal uzemljivača može poprimiti vrijednosti od nekoliko kilovolta prema dalekoj, neutralnoj(referentnoj) zemlji poseban oblik opasnosti može predstavljati tzv. iznošenje potencijala izvan visokonaponskog postrojenja. Do toga dolazi kada se posredstvom željezničkih tračnica, vodovodnih cijevi, telekomunikacijskih kabela te niskonaponskih vodova (metalni plašt kabela, PEN vodiči), a koji su spojeni na zajednički uzemljivač, potencijal prenosi u područje malog ili nikakva potencijala prema referentnoj zemlji."




Slika 4.6. Iznošenje potencijala

Na slici (Slika 4.6.) uz desni kraj se vidi čovjek koji dira uzemljenu strukturu koja se nalazi daleko od uzemljivača na neutralnoj zemlji što je vidljivo iz donje krivulje razdiobe potencijala. U ovom slučaju čovjek će premostiti napon $U_{zmax}$koji je poprimio visoku, po život opasnu vrijednost i taj prikaz predstavlja izneseni potencijal. Ostala tri čovjeka sa slike također su pod utjecajem napona dodira $U_d$ $i$ $U_{um}$, odnosno napona koraka $U_k$ te se iz krivulje razdiobe potencijala da zaključiti kako su oni u manjoj opasnosti od krajnjeg desnog čovjeka koji je na iznešenom potencijalu.

## 4.5. Zaštita od strujnog udara

Rad s većim vrijednostima napona i struje predstavlja opasnost za sva živa bića, a u prvom redu za čovjeka. Današnji svijet tehnologije i modernog života nezamisliv je bez električne energije i za posljedicu puno poslova se odvija u blizini korištenja i proizvodnje električne energijete se iz tog razloga mora razmatrati zaštita od strujnog udara. Ne postoji apsolutna zaštita, ali postoji maksimalna zaštita koja je definirana zakonima i propisanim pravilima o sigurnosti u opasnom okruženju.

"Zaštita od električnog udara u postrojenjima izvodi se onemogućenjem slučajnog dodira dijelova pod naponom i/ili ograničenjem vrijednosti i trajanja struje koja bi prolazila kroz tijelo čovjeka pri dodiru dijelova postrojenja koji normalno nisu pod naponom, ali bi mogli doći pod napon pri kvarovima i poremećajima sustava u postrojenju ili mreži" kako je navedeno u literaturi [3].

Osiguravanje mjesta rada u elektroenergetskom postrojenju je od iznimne važnosti. Prije samog početka rada na uređajima u beznaponskom stanju mora se osigurati mjesto rada primjenom opće poznatih pet pravila sigurnosti:

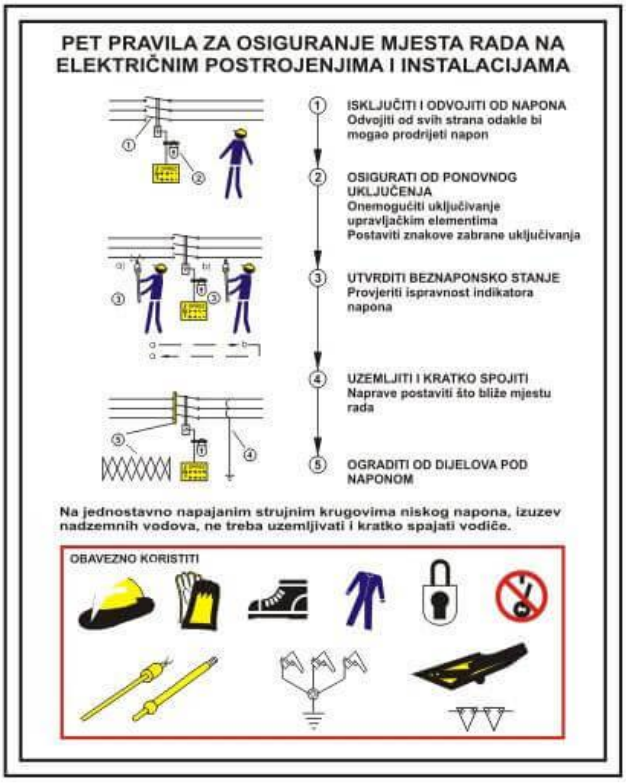
1. Iskapčanjem odvojiti od napona,

2. Mjesto rada osigurati od mogućnosti ponovnog ukapčanja,

3. Provjeriti beznaponsko stanje,

4. Uzemljiti i kratko spojiti,

5. Ograditi od dijelova postrojenja[11]



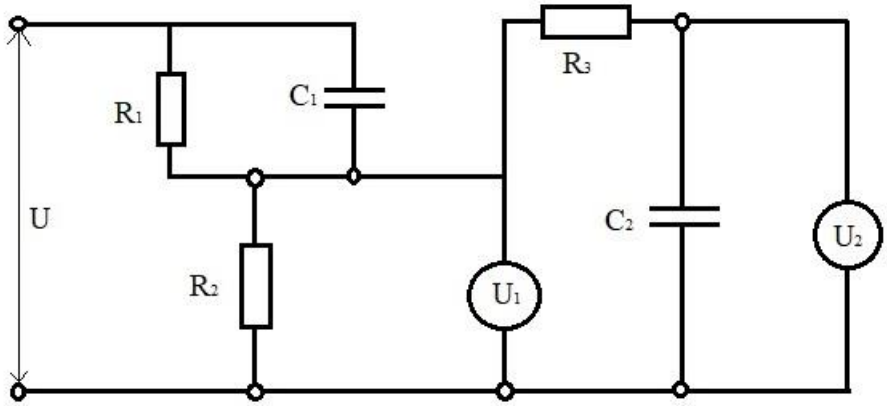

Slika 4.7. Pet pravila sigurnosti prilikom rada na električnim postrojenjima i instalacijama [11]

### 4.5.1. Utjecaj struje na tijelo

Utjecaj električne struje ima nekoliko posljedica na ljudsko tijelo ako se ostvari kontakt s opasnim vrijednostima struje. Opekline nastaju zbog toplinskog utjecaja, razaranje tkiva nastaje na mjestima ulaska odnosno izlaska struje, kemijskim utjecajem dolazi do rastavljanja krvne plazme te biološko djelovanje koje obuhvaća stezanje mišića, prestanak disanja i paralizu srčanog mišića.

Nadalje, u literaturi [1] je opisano da "kod napona od 240 V i viših napona, dolazi do proboja kože s dubokim opeklinama. Na tome se mjestu impedancija tijela znatno smanjuje te unutarnja impedancija tijela postaje najznačajniji faktor ograničavanja struje".

Kakve će biti posljedice ovisi o jakosti struje i trajanju udara. Prema Ohmovom zakonu, jakost struje je ovisna o impedanciji cijelog strujnog kruga, a ne samo impedanciji tijela, ali je impedancija vanjskog kruga zanemarivo male vrijednosti te se može izostaviti iz računa. Glavni utjecaj na impedancija tijela predstavlja otpor kože koji se znatno smanjuje u slučaju kada je koža mokra, a može pasti na vrlo opasnu razinu od samo 1% ukupne vrijednosti. Na visokim frekvencijama iznad 1000 Hz impedancija tijela postaje nelinearna što je uzrokovano staničnom strukturom tkiva te može doći do smanjenja impedancije od 50% u slučaju promjene frekvencije od 50 do 50000 Hz [1].




Slika 4.8. Nadomjesna električna shema tijela [1]

Na slici (Slika 4.8.) je prikazana nadomjesna električna shema tijela gdje su:

$R_1$ - ulazni djelatni otpor kože čovjekova tijela

$C_1$ - ulazni kapacitet kože čovjekova tijela

$R_2$ - izlazni djelatni otpor kože čovjekova tijela

$C_2$ - izlazni kapacitet kože čovjekova tijela

$R_3$ - unutarnji djelatni otpor čovjekova tijela

$U$ -napon pod kojim je čovjek u primjeru električnog udara

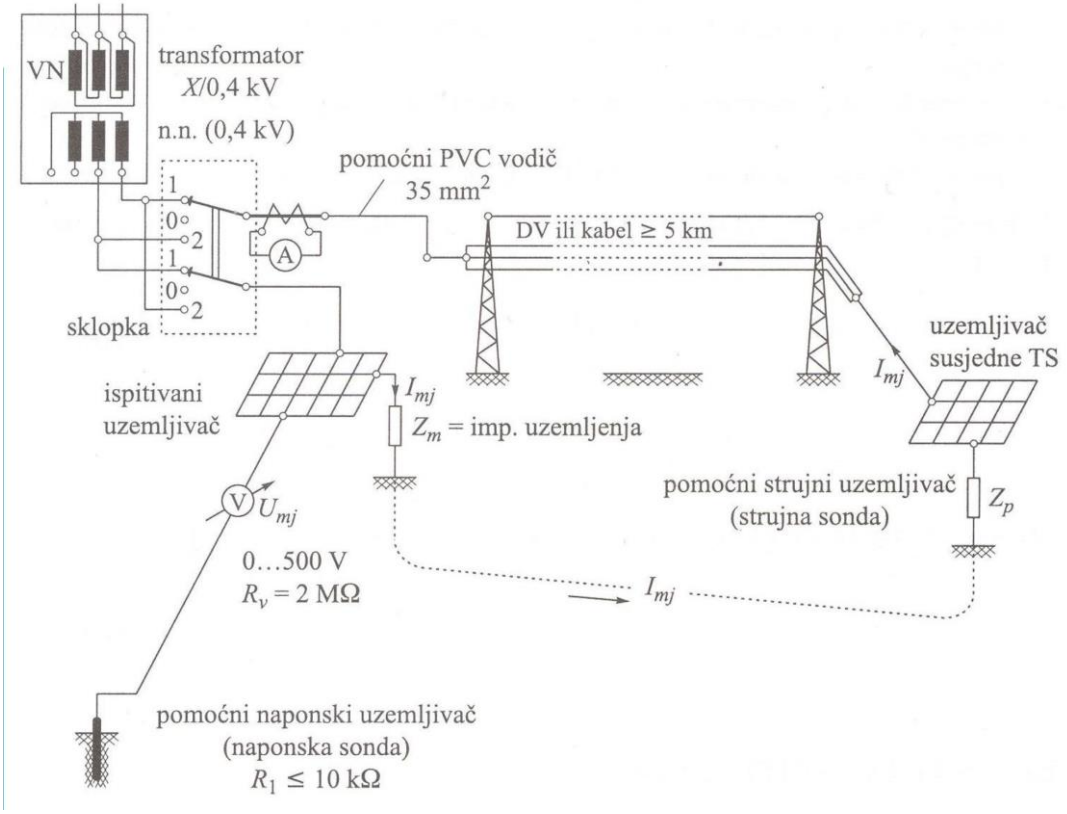
$U_1$ - napon na izlazu struje iz kože u tijelo čovjeka

$U_2$ - napon na izlazu struje iz čovjekova tijela

# 5. MJERENJE OTPORA UZEMLJENJA VISOKONAPONSKOG POSTROJENJA

Mjerenje otpora uzemljenja postrojenja je važan proces te je zakonski određeno da se mora redovno obavljati zbog sigurnosti ljudi i imovine. Mjerene vrijednosti moraju biti unutar zadanih granica (što manji otpor uzemljenja) kako bi se utvrdilo da uzemljivač normalno obavlja svoju zadaću i da ne predstavlja opasnost za ljude. Uzemljivač može s vremenom degradirati posebno ako se nalazi u korozivnom tlu, zato je važno tokom samog projektiranja i polaganja uzemljivača obratiti pozornost na sve parametre koji će utjecati na njegovu funkciju.

Prema literaturi [2] "mjerenje otpora uzemljenja za postrojenja nazivnog napona većeg od 1000 V provodi se izmjeničnim naponom, U-I metodom. Narinućem izmjeničnog napona mrežne frekvencije između ispitivanog i pomoćnog uzemljivača mjerna struja $I_{mj}$ koja prouzrokuje mjerljivo podizanje potencijala (current-injection method). Udaljenost između ispitivanog i pomoćnog uzemljivača ne smije biti manja od 5 km odnosno određena je peterostrukom najvećom protegnutošću uzemljivača. Unutarnji otpor voltmetra kojim se mjeri napon između uzemljivača i naponske uzemljivačke sonde mora biti najmanje deset puta veći od otpora uzemljenja sonde.", a opisana situacija nalazi se na slici (Slika 5.1.).




Slika 5.1. Shema mjerenja U-I metodom na mrežastom uzemljivaču [1]

Prema shemi mjerenja na slici (Slika 5.1.) pri ispitivanju uspostavlja se sljedeći strujni krug:

-ispitivani uzemljivač - izvor - mjerni uređaj - vod mjerne struje - pomoćni uzemljivač - zemlja - ispitivani uzemjivač [1].

Kao izvor izmjeničnog napona u praksi se najčešće koristi kućni transformator koji ima prijenosni omjer x/0.4 kV čije je zvjezdište na sekundarnoj strani (0.4 kV) često odvojeno od samog uzemljenja, a dvije faze su spojene na uzemljivač koji se ispituje u svrhu dobivanja veće mjerne struje. U tom slučaju dobiva se narinuti napon u iznosu od 380 V između strujne sonde i ispitivanog uzemljivača[2].

Kada se ispituje sustav uzemljenja, osim mjerenja utisnute struje u uzemljivač, mjeri se i napon na uzemljivaču, dodirni napon te napon koraka. Mjerenje koje se vrši je djelomično prikazano na slici (Slika 5.1.). Jedan od izvoda voltmetra fiksan je  i spojen na promatrani uzemljivač, a drugi izvod se pomiče duž pravca van postrojenja do trenutka kada više ne postoji prirast napona (barem tri posljednje točke duž pravca moraju pokazivati istu vrijednost). Tada se može reći da je izmjeren napon uzemljenja koji će se koristiti u daljnjim proračunima. Potrebno je više takvih mjerenja duž više različitih pravaca da bi se mogla napraviti slika raspodjele potencijala postrojenja i njegove okoline [2].

## 5.1. Mjerenje napona dodira i napona koraka

Kod mjerenja dodirnog napona, prema važećim propisima, mora se koristiti voltmetar unutarnjeg otpora 1 kΩ što najbliže opisuje unutarnji otpor ljudskog tijela [2].

Prema literaturi [2] "mjerne elektrode za oponašanje stopala imaju površinu od ukupno 400 $cm^2$, a na tlo su pritisnute minimalnim pritiskom 500 N. Kod mjerenja napona dodira elektrode se postavljaju na mjesto stajanja na udaljenosti 1 m od dijela postrojenja izloženog dodiru (najnepovoljniji slučaj). Napon koraka mjeri se na rasponu od 1 m. Rezultati mjerenja napona dodira preračunavaju se omjerom računski dobivenih najnepovoljnijih struja jednopolnog kvara s mjernom strujom."

## 5.2. Uklanjanje utjecaja smetnji

Kod mjerenja napona uzemljivača, napona dodira i koraka može doći do greške u mjerenju zbog naponskih smetnji i stranih napona koji se javljaju zbog induktivnog utjecaja dugačkih mjernih vodova, induktivnog utjecaja krugova ispitne struje zbog susjednih sustava u pogonu i sl. [2].

Primjeri metoda eliminacije utjecaja smetnji prema literaturi[1]:

- Metoda titranja
- Metoda promjene polariteta
- Vektorsko mjerenje
- Blokiranje istosmjernih struja

# 6. SIMULACIJA I ANALIZASUSTAVA UZEMLJENJA VISOKONAPONSKOG POSTROJENJA

Simulacija i analiza uzemljivačkog sustava visokonaponske trafostanice provela se u programskom paketu XGSLab. XGSLab je jedan od softverskih alata koji služe za elektromagnetske simulacije, analize uzemljivačkih sustava i gromobranske zaštite te u obzir uzima "međunarodni (**IEC/TS 60479-1:2005**), europski (**EN 50522:2010**) i američki (**IEEE Std 80-2000 i IEEE Std 80-2013**) standard u analizi uzemljivačkihsustava" prema literaturi [13]. Korišten je GSA modul (Ground System Analysis) module unutar XGSLaba koji sadrži sve potrebne alate za simulaciju i analizu uzemljivačkog sustava.

Analiza je provedena na visokonaponskom postrojenju TS 110/10 kV na području Osijeka čiji su podaci preuzeti iz izvedbenog projekta i korišteni za simulaciju i analizu stanja uzemljivačkogsustava, potencijale zemljišta te napone koraka i dodira.

## 6.1. Tehnički opis postrojenja

### 6.1.1. Opis tla

Podaci za specifični otpor tla dobiveni su Schlumbergerovom metodom, a rezultati mjerenja su bili slijedeći:

$\rho_1$ = 70 Ωm - za gornji sloj tla, do dubine od 70 cm

$\rho_2$ = 20 Ωm - za donji sloj tla, za dubine veće od 70 cm

Iz navedenih rezultata se vidi da donji sloj tla ima puno manji specifični otpor, što je u slučaju promatranog postrojenja povoljnije jer je uzemljivač postavljen na dubini 80 cm.

Specifični otpor tla s kojim se išlo u daljnje proračune, dobiven optimiranjem rezultata mjerenja i svođenjem mjerenog dvosloja na ekvivalentni jednosloj, iznosi :

$\rho$ = 25 Ωm

### 6.1.2. Opis uzemljivača

Uzemljivač je napravljen od pocinčane željezne trake ( FeZn ), dimenzija 30x4 mm. Položen je tako da čini relativno pravilnu mrežu, čija veličina okana ne prelazi dimenzije 15x15 m. Traka je položena u rov, na dubinu od 80 cm. Rov je zatrpan rastresitim materijalom dobre vodljivosti. Spojevi u zemlji su izvedeni pomoću pocinčanih vijaka i svaki spoj je zaliven olovom radi zaštite od korozije. Na udaljenosti od 2-3 metra od rubova mreže uzemljivača položena je ograda koja je galvanski odvojena od glavnog u zemljivača i spojena je na vlastiti uzemljivač koji se nalazi 1 metar od ograde izvan postrojenja, a ima iste karakteristike kao i glavni uzmeljivač. Ograda je spojena na 20 mjesta s vlastitim uzemljivačem.

### 6.1.3. Proračuni

Prema projektnom zadatku i izvedenim proračunima, dobivene su sljedeće vrijednosti :

$I_{k1pol}$ = 15 kA - struja jednopolnog kratkog spoja

l = 2216 m - duljina FeZn trake koja služi za glavni uzemljivač

S = 8680 $m^2$ - površina terena obuhvaćena uzemljivačem

D = 105.3 m - računski promjer uzemljivača

$R_{ST}$ = 0.1142 Ω - otpor rasprostiranja uzemljivača

$R_1$ = 0.118 Ω - otpor stanica 10/0.4 kV koje sudjeluju u otporu sustava uzemljenja

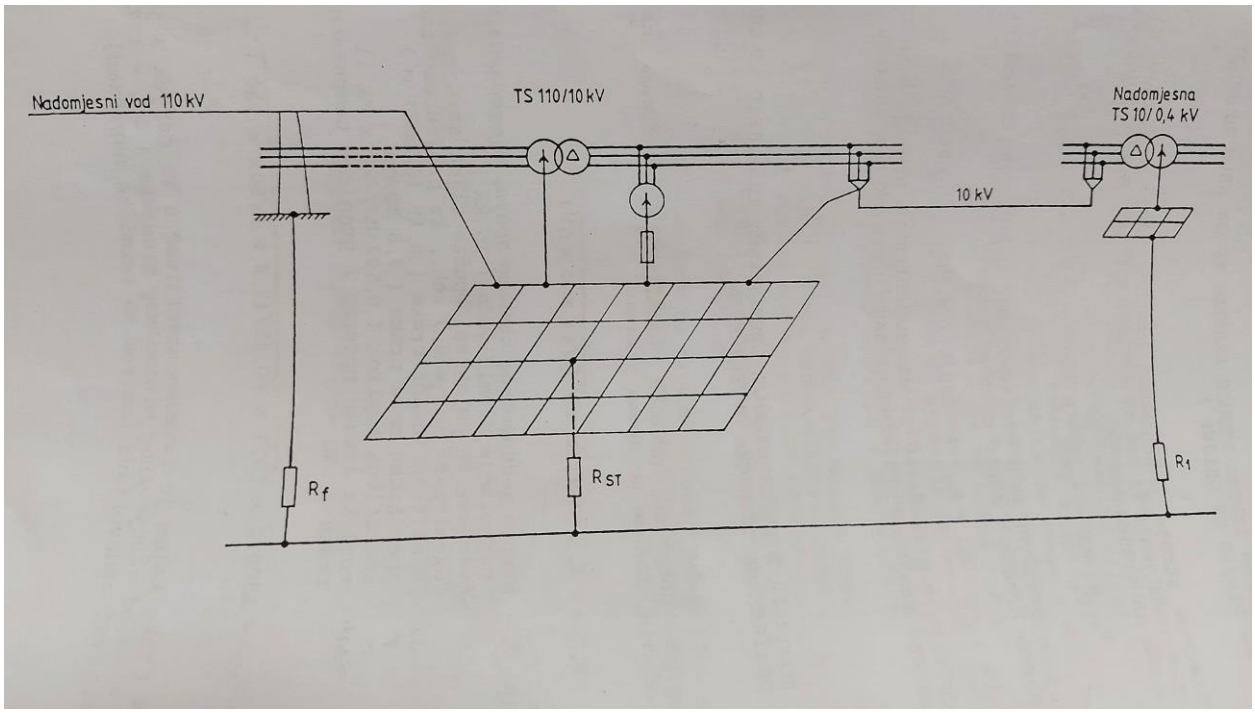
$R_f$ = 0.404 Ω - ulazni otpor nadomjesnog dalekovoda u postrojenje

$R_{SU}$ = 0.0507 Ω - otpor sustava uzemljenja TS 110/10 kV dobiven prema izrazu (6-1):

$$\frac{1}{R_{SU}} = \frac{1}{R_{ST}} + \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_f} \tag{6-1}$$

$V_{SU}$ = 760.5 V - potencijal sustava uzemljenja prolaskom $I_{k1pol}$ = 15 kA

$I_{UZ}$ = 6660 A - mjerodavna struja za dimenzioniranje uzemljivača obzirom na napone dodira i napone koraka




Slika 6.1. Prikaz sustava uzemljenja TS 110/10 kV [12]

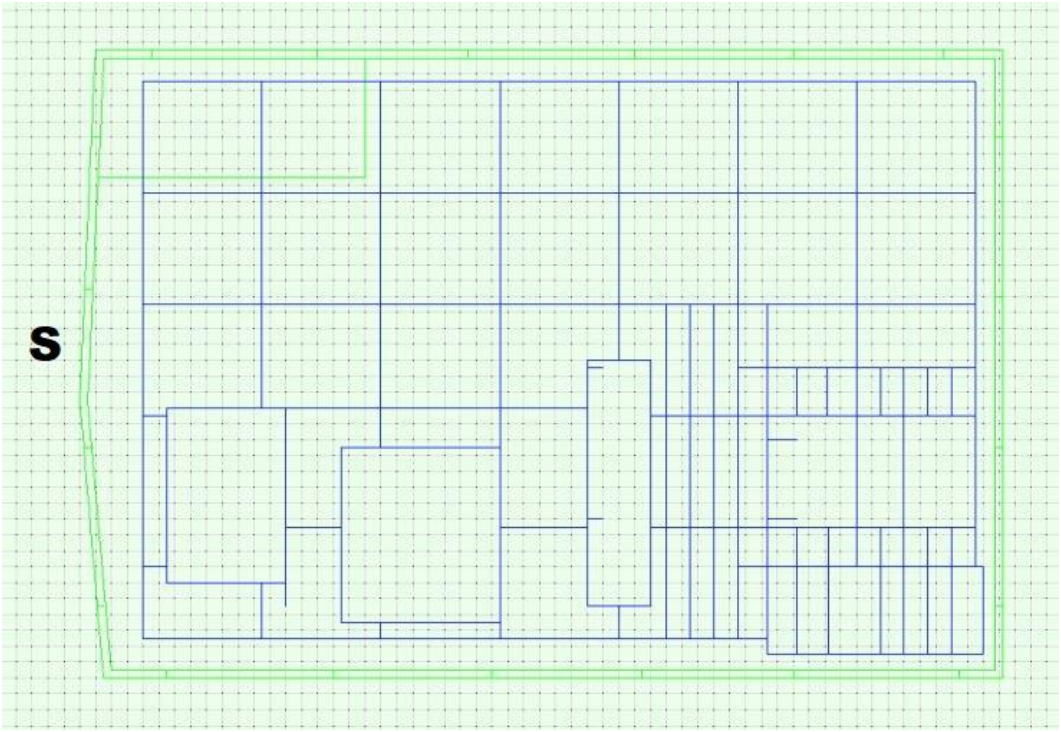
## 6.2. Rad u XGSLabu

Analiza je provedena za slučaj dvoslojnog tla i za slučaj jednoslojnog tla. U oba slučaja se promatrala situacija s galvanski odvojenom ogradom kako je navedeno u izvedbenom projektu te za situaciju s galvanski spojenom ogradom radi dobivanja usporedbe.

Korišten je modul GSA (Ground System Analysis) u kojemu je prvi korak odabir referentnog standarda prema kojemu će se analizirati vrijednost, a odabrani standard je europski (**EN 50522:2010**), kako je prikazano na slici (Slika 6.2.). Standard se odnosi na vrijednosti napona koraka i dodira, razdjelni faktor i mjere korištenih vodiča.

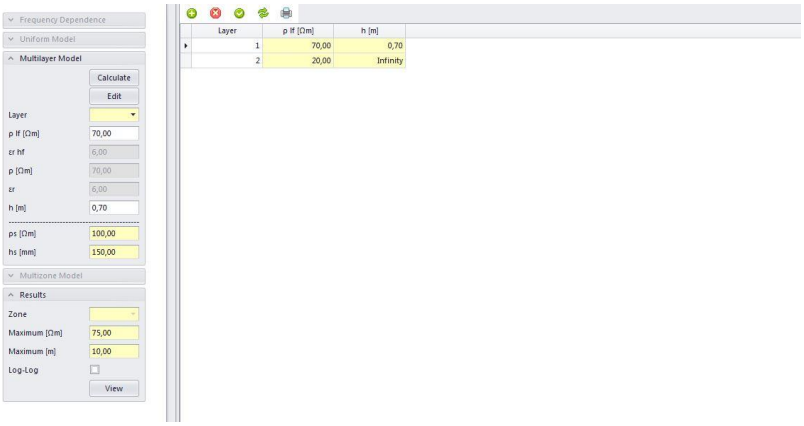
Slika 6.2. Odabir europskog standarda

Shema sustava uzemljenja u XGSlabu se sastoji zelenog dijela koji predstavlja ogradu na vlastitom uzemljivaču i plavog dijela koji predstavlja glavni uzemljivač postrojenja kao što se vidi na slici (Slika 6.3.).Vanjski rubovi zelenog dijela na shemi predstavljaju vlastiti uzemljivač ograde na udaljenosti 1m od same ograde. Oznaka S predstavlja orijentaciju postrojenja prema sjeveru. Posebnost ovog postrojenja je postojanje stambenog objekta (obiteljske kuće) unutar ograde koja se nalazi direktno iznad glavnog uzemljivača u sjeveroistočnom dijelu postrojenja.



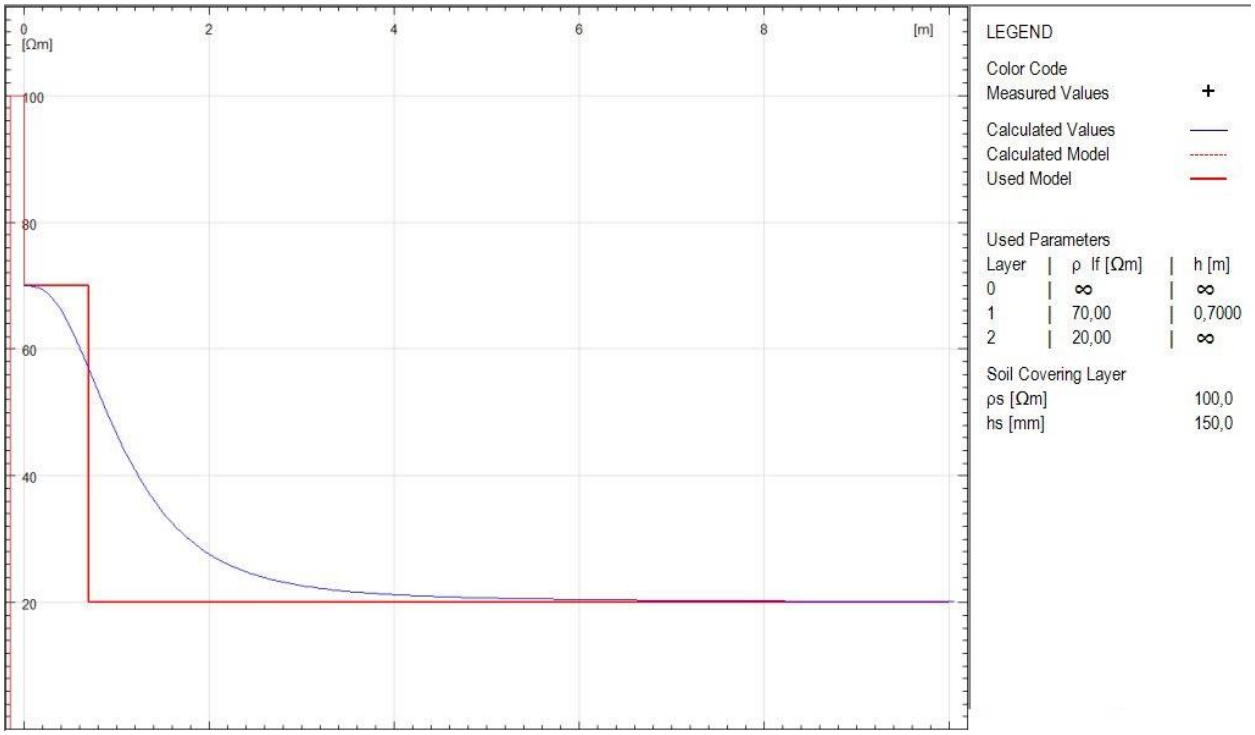

Slika 6.3. Shema sustava uzemljenja postrojenja

### 6.2.1. Slučaj dvoslojnog modela tla

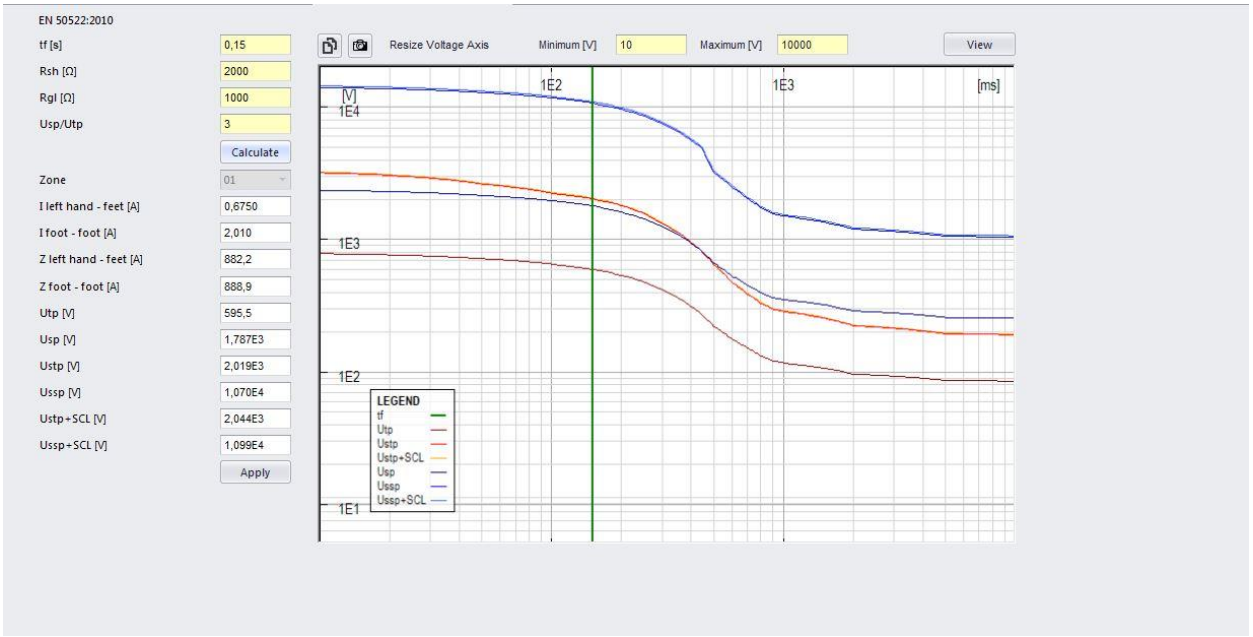



Slika 6.4. Unos parametara za dvoslojno tlo

Na slici (Slika 6.4.) se vidi odabrano dvoslojno tlo s prvim slojem otpornosti 70 Ωm i dubine 70 cm i drugim slojem otpornosti 20 Ωm i dubine veće od 70 cm. Površinski sloj je prekriven s 150 mm tla otpornosti 100 Ωm. Navedeni slučaj je grafički prikazan na slici (Slika 6.5.).




Slika 6.5. Grafički prikaz slučaja dvoslojnog tla




Slika 6.6. Dopuštene vrijednosti napona dodira i koraka prema europskom standardu

Na slici (Slika 6.6.) se nalazi grafički prikaz dopuštenih vrijednosti napona dodira i koraka za nekoliko slučajeva ako je vrijeme isključenja postavljeno na 150 ms (zelena linija). Dopušteni napon dodira Utp iznosi 595.5 V, a dopušteni napon koraka Usp iznosi 1787 V. U slučaju kada se koriste zaštitne cipele otpora 2000 Ω, dopušteni napon koraka raste na 10700 V, a u slučaju korištenja zaštitnih rukavica od 1000 Ω, dopušteni napon dodira raste na 2019 V. Naponi dodira i koraka u slučaju korištenja zaštitne opreme zanemarivo rastu ako se u proračun uključi površinski sloj tla otpornosti 100 Ωm i debljine 150mm.

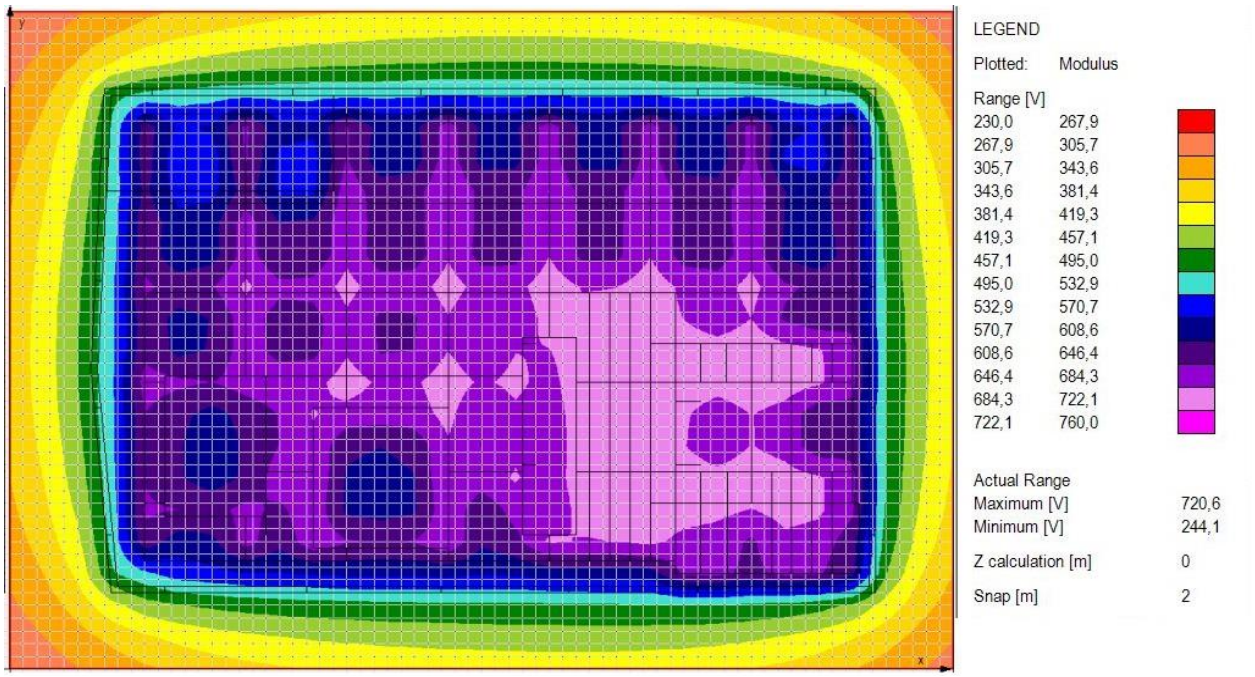
### 6.2.1.1. Galvanski odvojena ograda u slučaju dvoslojnog tla

Nakon unosa potrebnih ulaznih podataka, pokreće se simulacija za slučaj dvoslojnog tla.

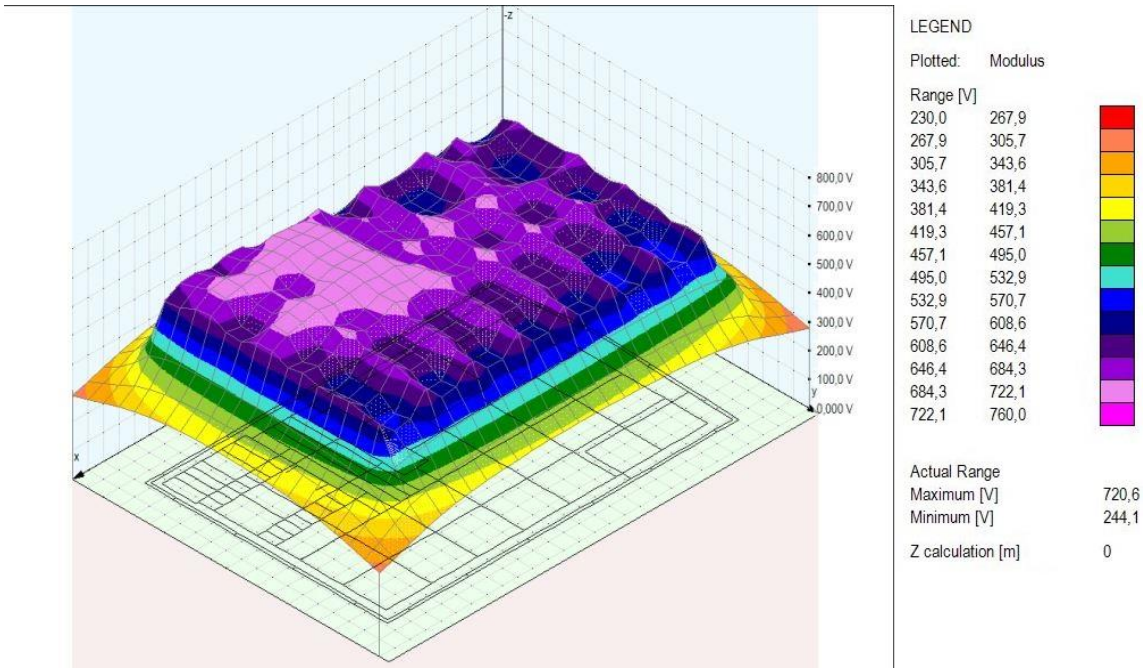
| Electrode | Electrode Name | \|Je\| [A] | ∠Je [deg] | \|Ue\| [V] | ∠Ue [deg] | \|Ue/ΣJe\| [Ω] | ∠(Ue/ΣJe) [deg] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 6660,000 | 0,000 | 738,965 | 0,000 | 1,11E-01 | 0,000 |
| 2 | 2 | 0,000 | 0,000 | 514,641 | 0,000 | Infinity | 0,000 |

Slika 6.7. Potencijal uzemljivača i otporuzemljenja

Prolaskom struje veličine 6660 A kroz glavni uzemljivač dolazi do porasta potencijala zemljišta i strukture glavnog uzemljivača dolaze na potencijal od 738 V, a strukture ograde i njezinog uzemljivača dolaze na potencijal od 514 V koji su preuzele od zemljišta. Otpor glavnog uzemljivača iznosi 0.111 Ω. Dobivene veličine koje su vidljive na slici (Slika 6.7.) su gotovo identične veličinama iz projektnog zadatka.

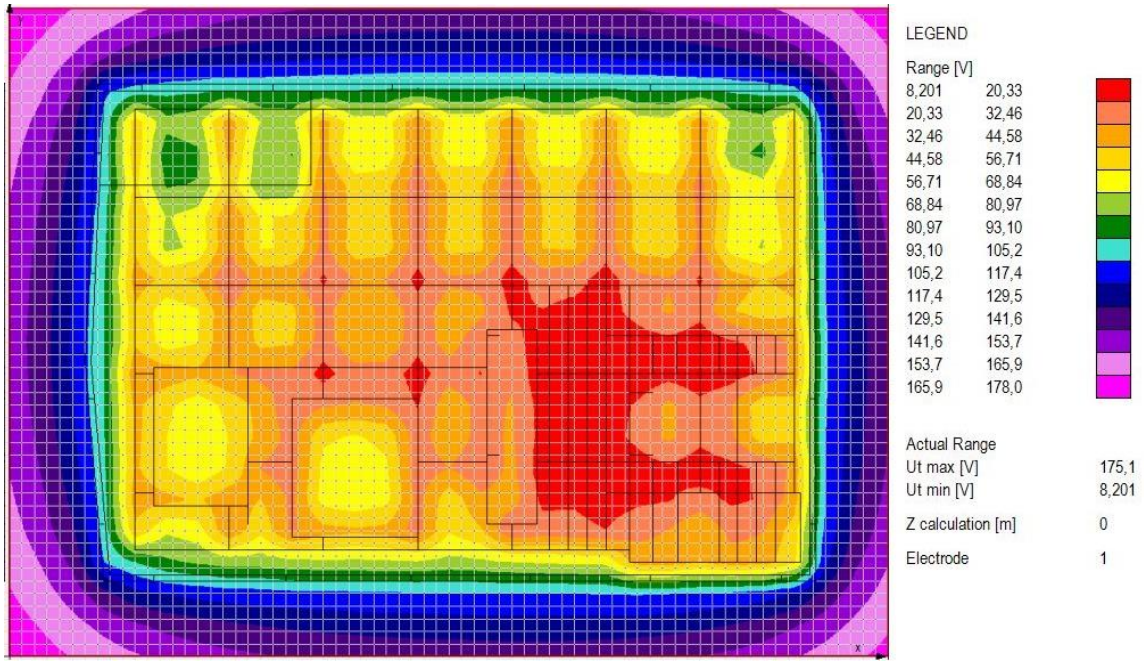



Slika 6.8. 2D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski odvojena

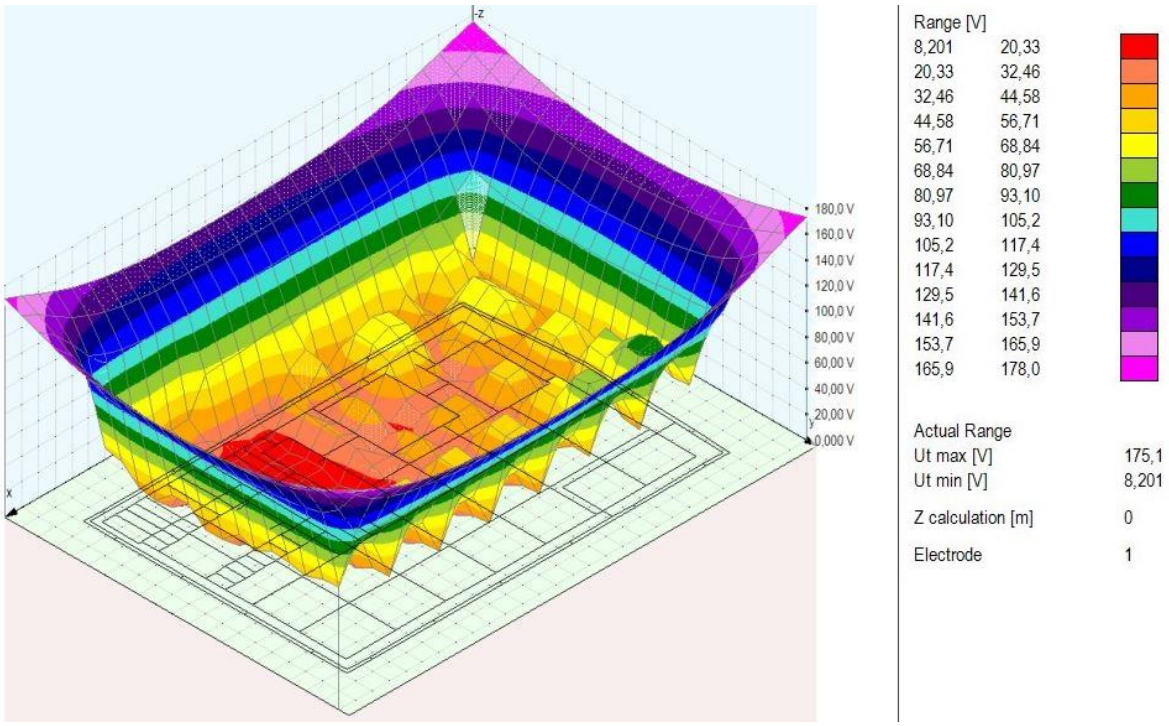



Slika 6.9. 3D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski odvojena

Iz slika (Slika 6.8. i Slika 6.9.) se vidi raspodjela potencijala zemljišta kada je ograda galvanski odvojena. Najveći potencijal je tamo gdje se nalaze zakopani metalni dijelovi glavnog uzemljivača kroz koje teče struja, a ograda i njezin uzemljivač poprimaju potencijal zemlje na kojem se nalaze u tom naponskom lijevku. Gradijent raspodijele potencijala postaje blaži s udaljavanjem od glavnog uzemljivača kako se ide van postrojenja.

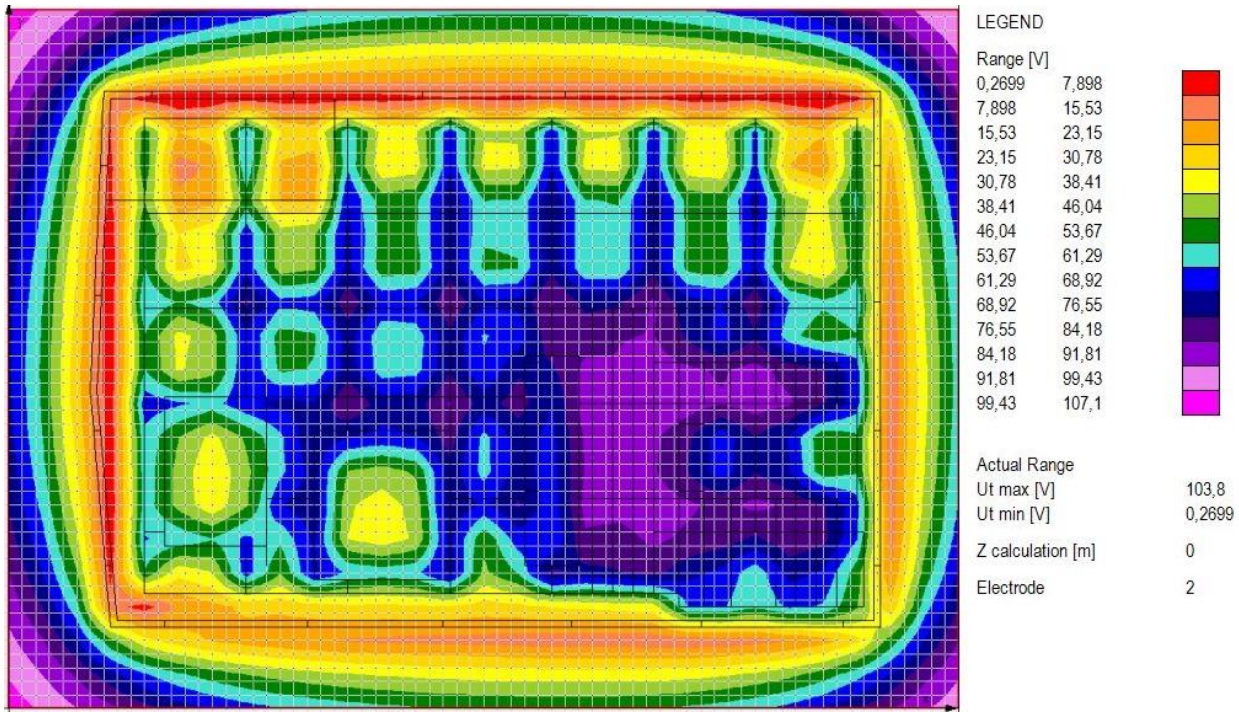



Slika 6.10. 2D prikaz napona dodira, ograda galvanski odvojena

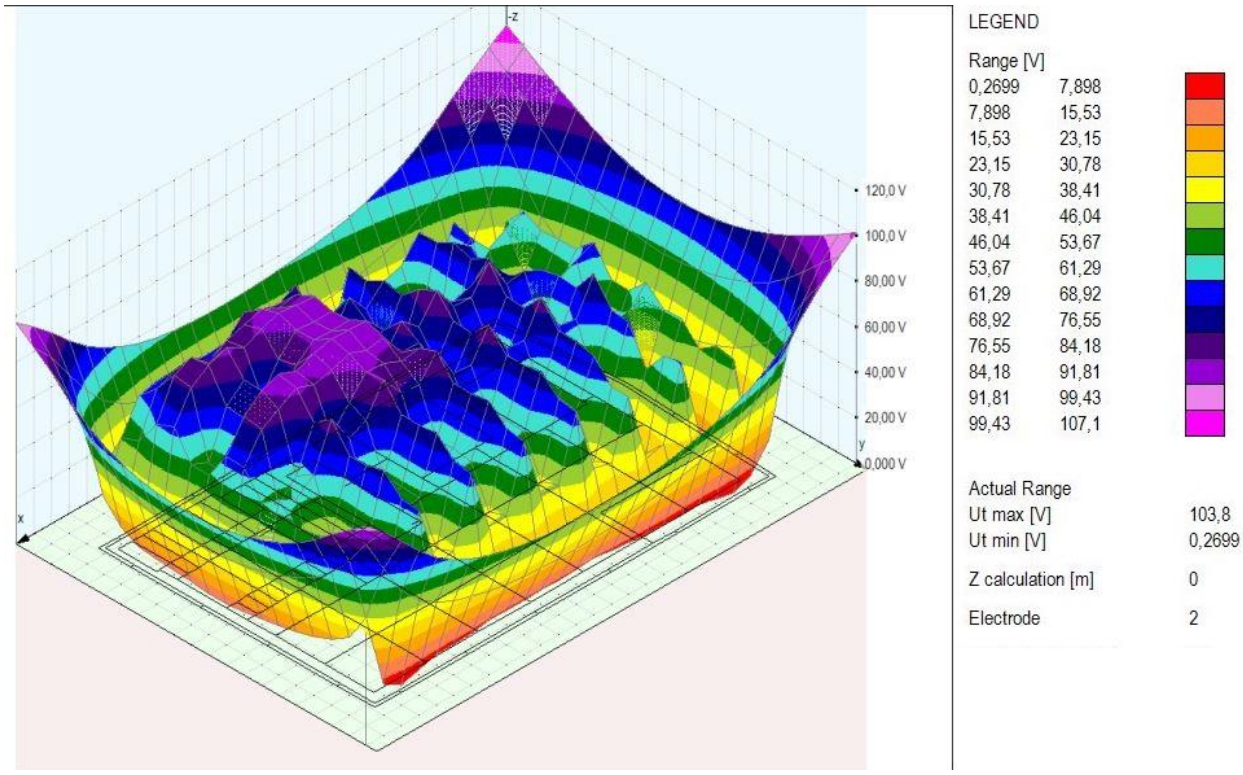



Slika 6.11. 3D prikaz napona dodira, ograda galvanski odvojena

Na slikama (Slika 6.10. i Slika 6.11.) prikazani su naponi dodira kada je ograda galvanski odvojena i kroz glavni uzemljivač teče struja. Dodirni napon se uzima u obzir kada bi osoba dotaknula strukturu koja je uzemljena na glavni uzemljivač. Što je veći gradijent raspodjele potencijala to je veća opasnost i zato je najmanji dodirni napon tamo gdje je najgušće raspoređena mreža uzemljivača koja utječe na ublažavanje tog gradijenta. Najveći dodirni napon je izvan postrojenja i zato postoji potencijalna opasnost od iznošenja potencijala van postrojenja posredstvom metalne konstrukcije koja bi se nalazila van postrojenja, a spojena je na glavni uzemljivač. Ograda i posebno kutovi ograde postrojenja također mogu predstavljati problem za napone dodira i zato se taj problem mora uzeti u obzir pri samom projektiranju postrojenja.



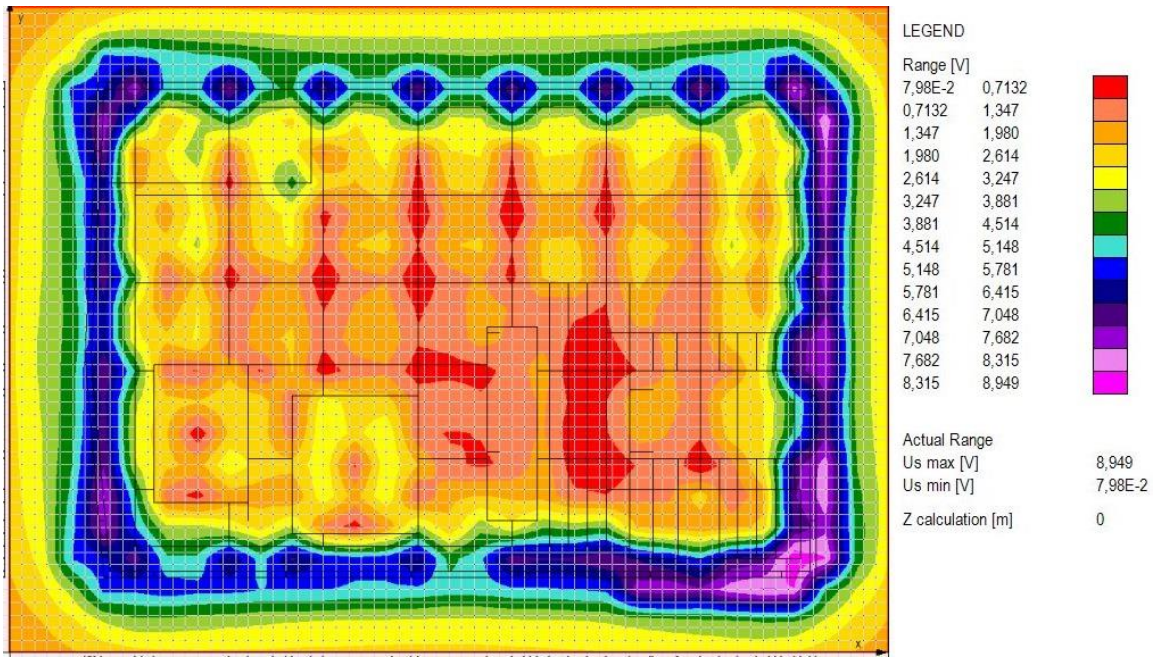

Slika 6.12. 2D prikaz napona dodira s obzirom na ogradu, ograda galvanski odvojena



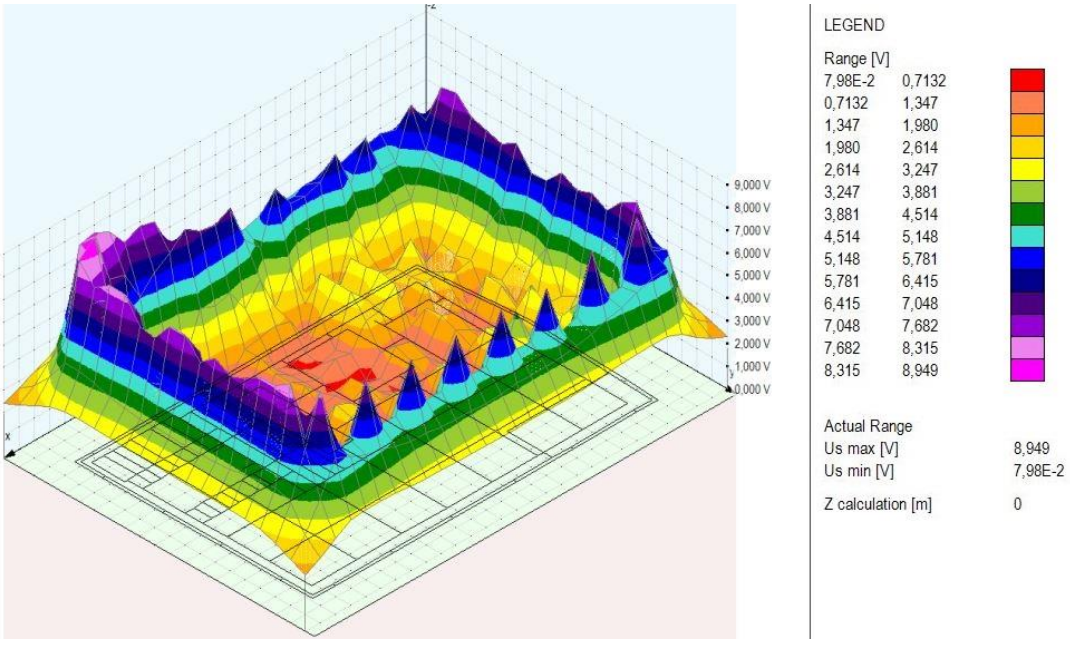

Slika 6.13. 3D prikaz napona dodira s obzirom na ogradu, ograda galvanski odvojena

Na slikama (Slika 6.12. i Slika 6.13.) prikazani su naponi dodira s obzirom na ogradu kada je ograda galvanski odvojena i kroz glavni uzemljivač teče struja. Dodirni napon se uzima u obzir kada bi osoba dotaknula ogradu i zato su najniži naponi dodira uz samu ogradu i povećavaju se

udaljavanjem od ograde prema unutrašnjosti postrojenja odnosno udaljavanjem van postrojenja. Gradijent raspodjele potencijala je najstrmiji uz samu ogradu i udaljavanjem od ograde postaje sve blaži.



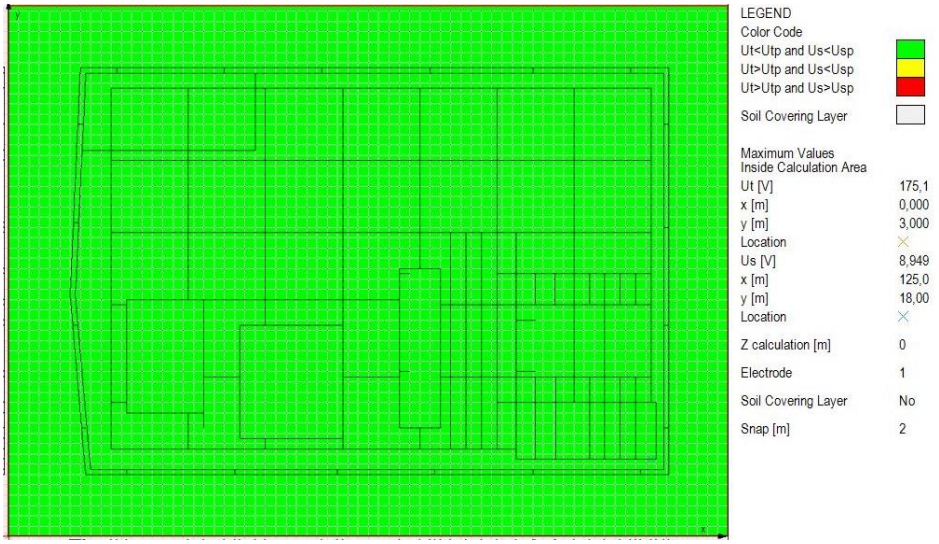

Slika 6.14. 2D prikaz napona koraka, ograda galvanski odvojena




Slika 6.15. 3D prikaz napona koraka, ograda galvanski odvojena

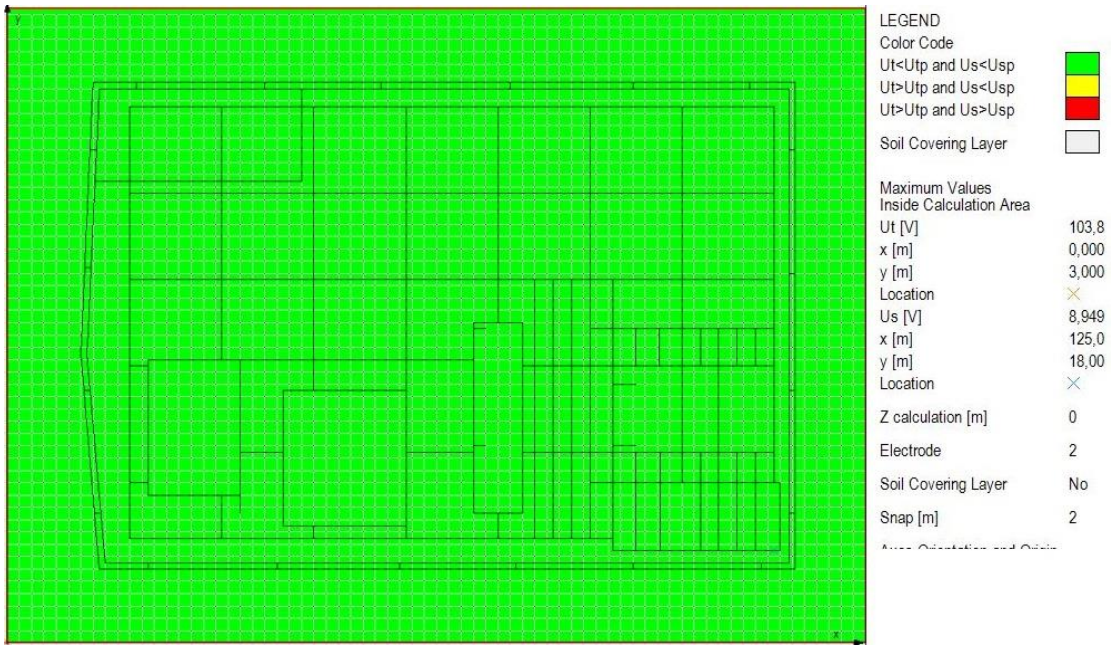
Na slikama (Slika 6.14. i Slika 6.15.) se nalaze prikazi napona koraka kada je ograda galvanski odvojena i kroz glavni uzemljivač teče struja. Napon koraka se uzima u obzir kada se hoda unutar ili van postrojenja, a širina koraka se uzima da je 1 m . Najveći gradijent raspodjele

potencijala nalazi se uz samu ogradu i njezine kuteve, a najmanji gradijent se nalazi unutar postrojenja. Iz slika je vidljivo da su svi naponi koraka vrlo male vrijednosti što ne predstavlja opasnost za osobe koje se nalaze unutar i u blizini postrojenja.



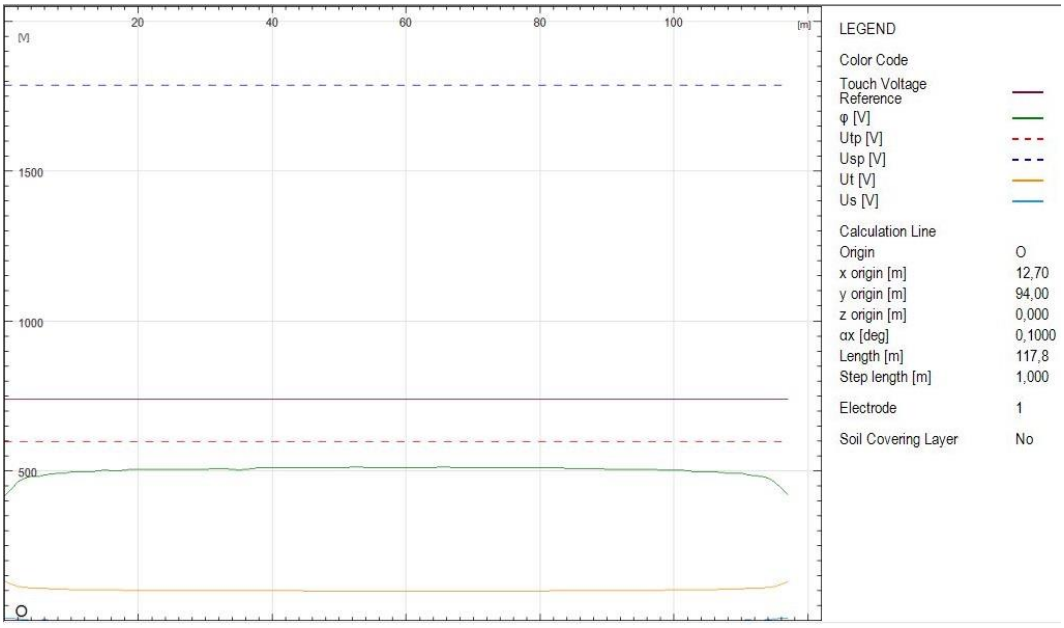

Slika 6.16. Prikaz sigurnih područja unutar i van postrojenja s obzirom na napone dodira i koraka

Na slici (Slika 6.16.) se vidi prikaz postrojenja prema kojemu se promatraju sigurna i nesigurna područja s obzirom na napone dodira i koraka u slučaju galvanski odvojene ograde, a referentna struktura je glavni uzemljivač. Cijeli prikaz se nalazi u zelenom što govori da je cijelo područje postrojenja i u blizini postrojenja sigurno za kretanje u slučaju pojave struje kvara.




Slika 6.17. Prikaz sigurnih područja unutar i van postrojenja s obzirom na napone dodira i koraka, a referentna struktura je ograda postrojenja

Na slici (Slika 6.17.) se vidi prikaz postrojenja prema kojemu se promatraju sigurna i nesigurna područja s obzirom na napone dodira i koraka u slučaju galvanski odvojene ograde, a referentna struktura je ograda postrojenja na vlastitom uzemljivaču. Cijeli prikaz se nalazi u zelenom što govori da je cijelo područje postrojenja i u blizini postrojenja sigurno za kretanje u slučaju pojave struje kvara.




Slika 6.18. Graf napona dodira i koraka uz istočnu ogradu na udaljenosti 1m, ograda galvanski odvojena

Sa slike (Slika 6.18.) se vide linije (crtkano) dozvoljenih dodirnih napona i napona koraka kada se hoda na udaljenosti 1m uz istočnu ogradu cijelom njezinom duljinom. Krivulje koje predstavljaju napon dodira (Ut) i napon koraka (Us) se nalaze daleko ispod dozvoljenih granica iz čega se zaključuje da je područje 1m uz istočnu ogradu sigurno za kretanje.

### 6.2.1.2. Galvanski spojena ograda u slučaju dvoslojnog modela tla

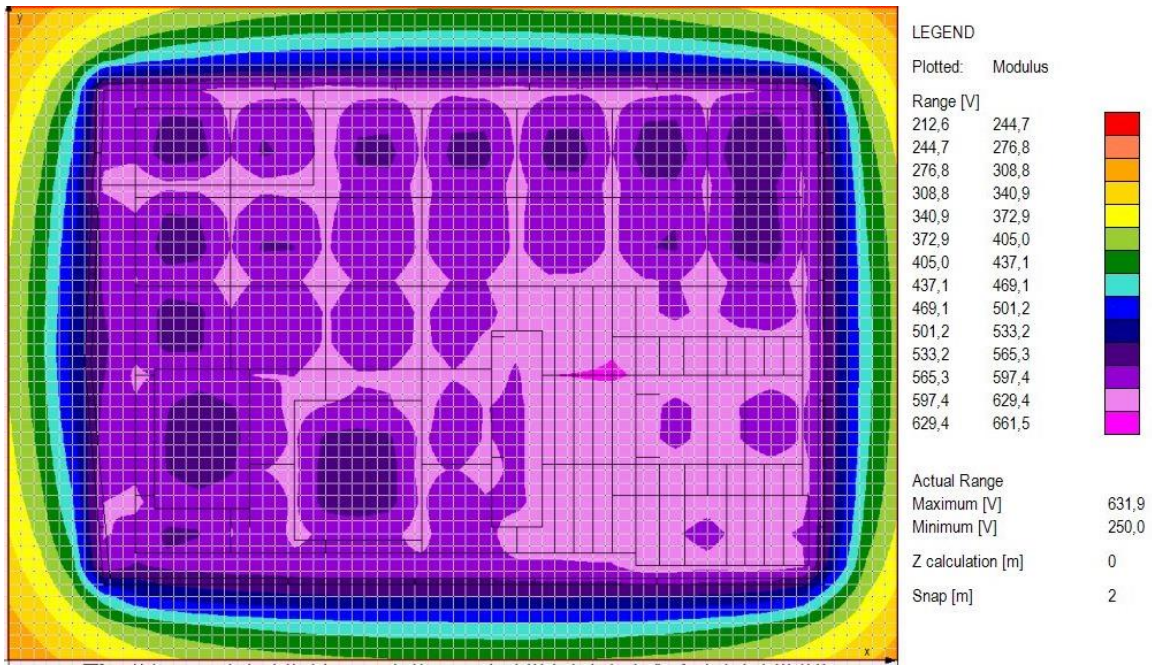
Sljedeći promatrani slučaj na dvoslojnom tlu je galvansko spajanje ograde na glavni uzemljivač.

| Electrode | Electrode Name | \|Je\| [A] | ∠Je [deg] | \|Ue\| [V] | ∠Ue [deg] | \|Ue/ΣJe\| [Ω] | ∠(Ue/ΣJe) [deg] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 6660,000 | 0,000 | 645,654 | 0,000 | 9,694E-02 | 0,000 |

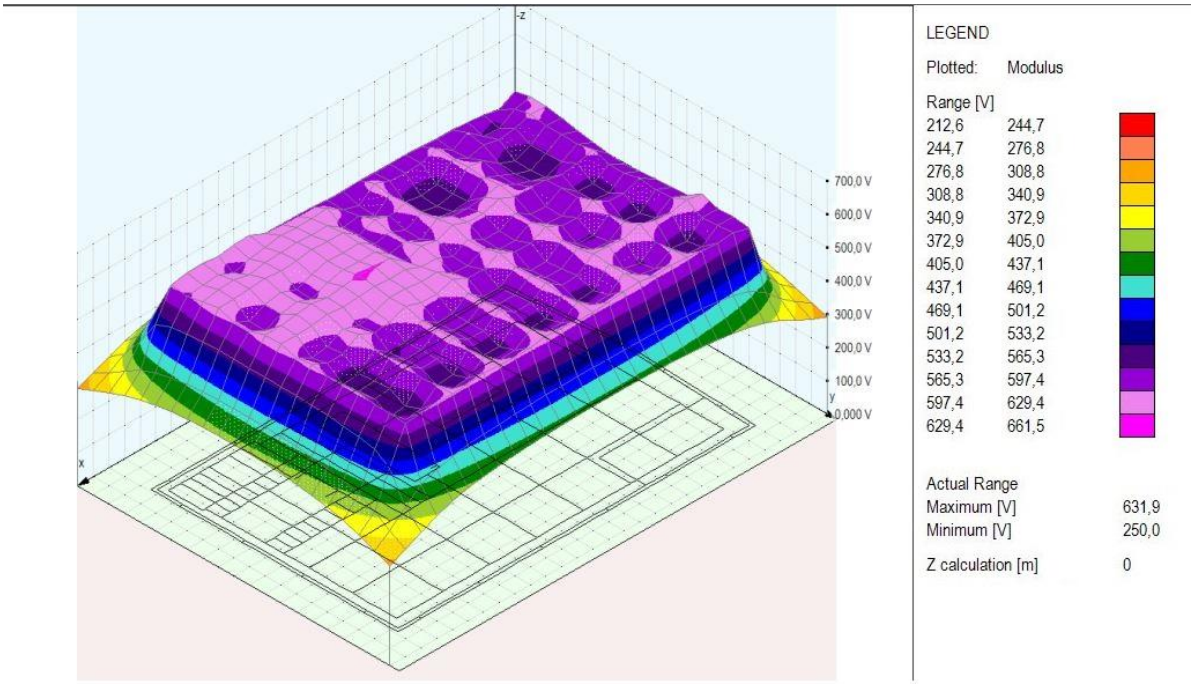
Slika 6.19. Potencijal spojenog uzemljivača i otpor uzemljenja

Prolaskom struje veličine 6660 A kroz uzemljivač dolazi do porasta potencijala zemljišta, a strukture glavnog uzemljivača te strukture ograde i njezinog uzemljivača dolaze na potencijal od

645 V. Otpor kombiniranog uzemljivača iznosi 0.0969 Ω što je manje naspram slučaja s galvanski odvojenom ogradom, što je bilo i očekivano zbog povećanja ukupne duljine uzemljivača.

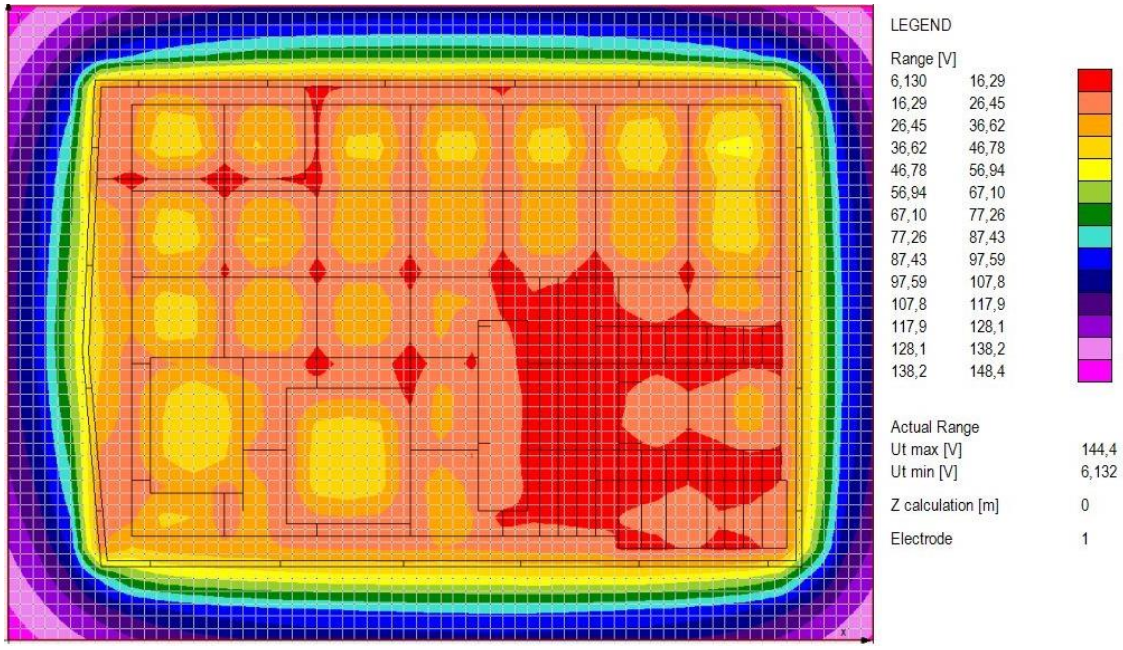



Slika 6.20. 2D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski spojena

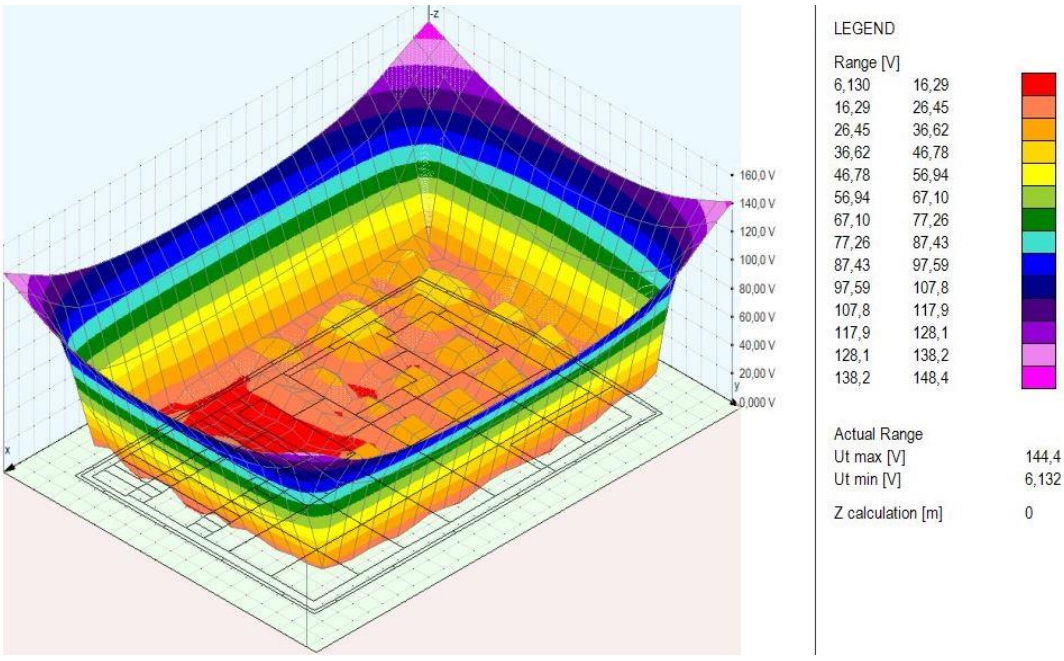



Slika 6.21. 3D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski spojena

Najveći potencijal zemljišta je manji naspram slučaja galvanski odvojene ograde i u ovom slučaju ograda je poprimila potencijal glavnog uzemljivača kao što je vidljivo na slikama (Slika 6.20. i Slika 6.21.)



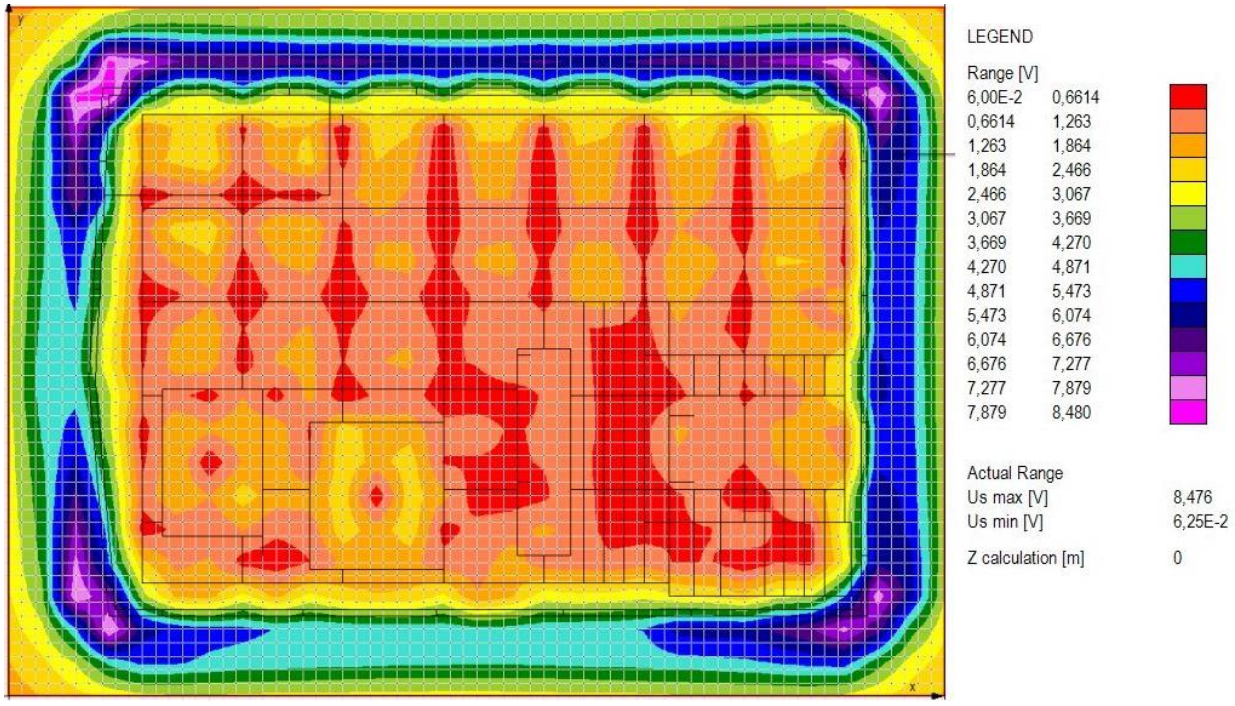

Slika 6.22. 2D prikaz napona dodira, ograda galvanski spojena



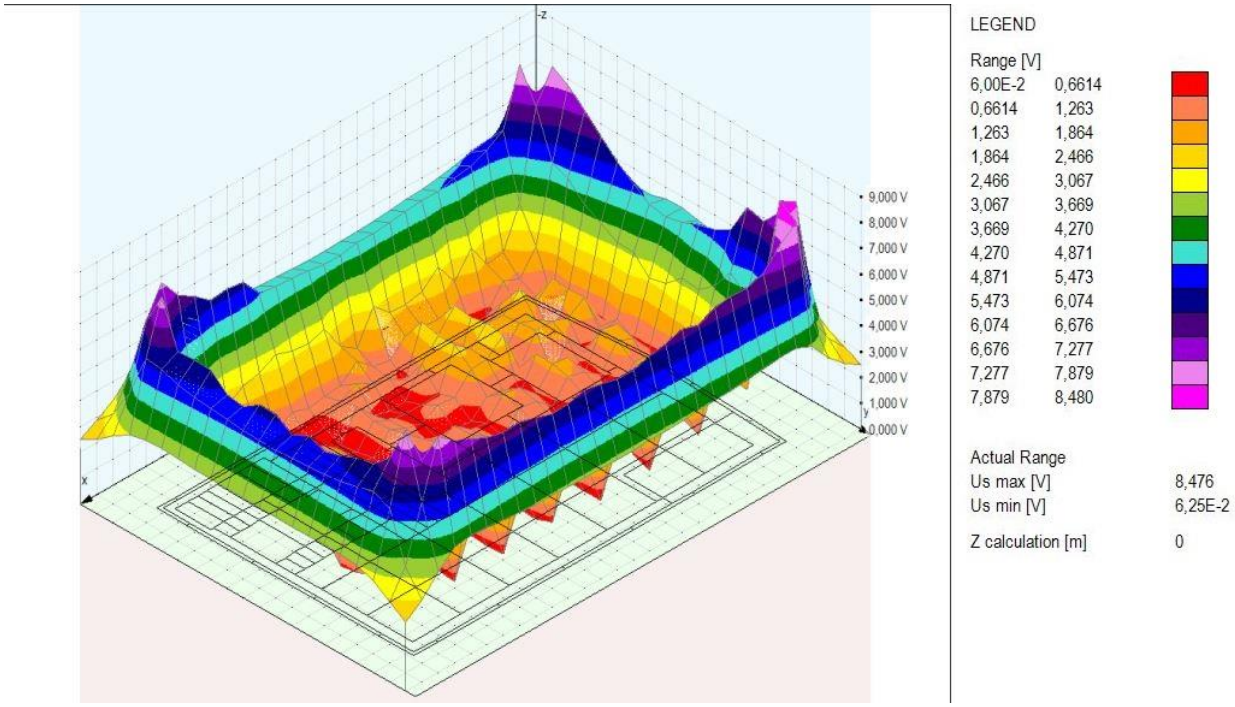

Slika 6.23. 3D prikaz napona dodira, ograda galvanski spojena

U slučaju galvanski spojene ograde na glavni uzemljivač, naponi dodira imaju manje apsolutne vrijednosti, nego što su imali u slučaju galvanski odvojene ograde. Potencijalni problem koji se javlja u ovom slučaju je gradijent raspodjele potencijala koji je strmiji u blizini ograde gledajući

van postrojenja odnosno veći dodirni napon koji može biti opasan u slučaju dodira ograde. Opisani slučaj je vidljiv na slikama (Slika 6.22. i 6.23.).

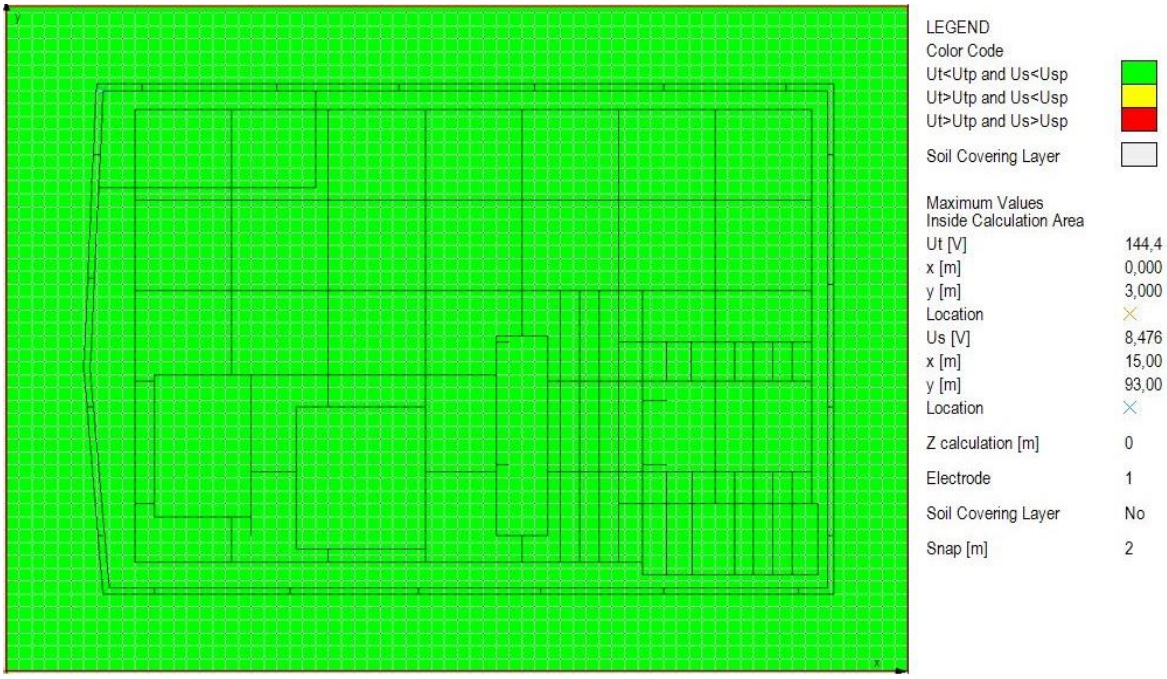



Slika 6.24. 2D prikaz napona koraka, ograda galvanski spojena



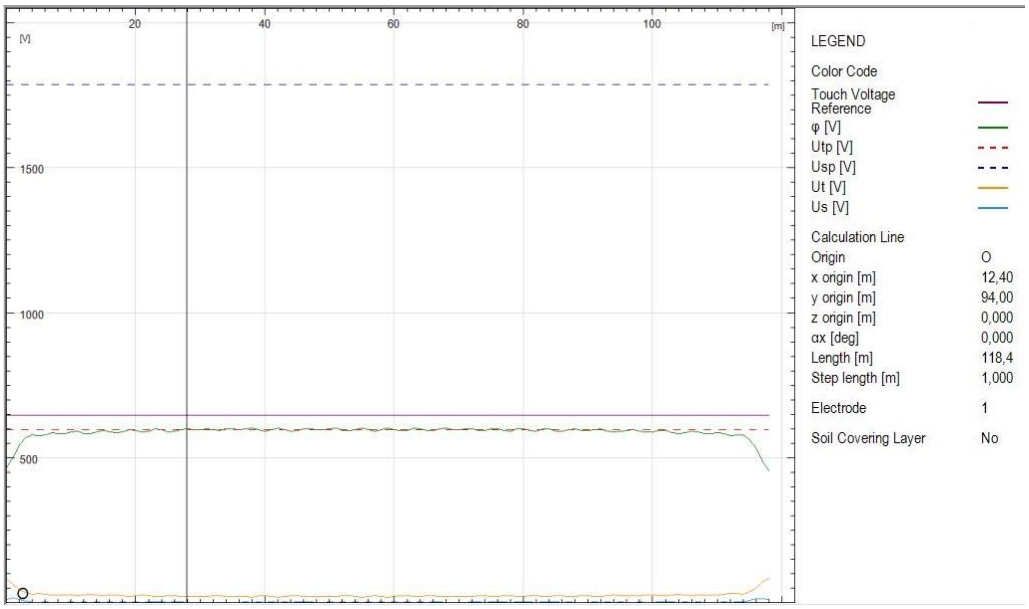

Slika 6.25. 3D prikaz napona koraka, ograda galvanski spojena

U slučaju galvanski spojene ograde naponi koraka poprimaju još blaže i sigurnije vrijednosti kao što je vidljivo na slikama (Slika 6.24. i Slika 6.25.) naspram vrijednosti iz slučaja s galvanski odvojenom ogradom.




Slika 6.26. Prikaz sigurnih područja unutar i van postrojenja s obzirom na napone dodira i koraka

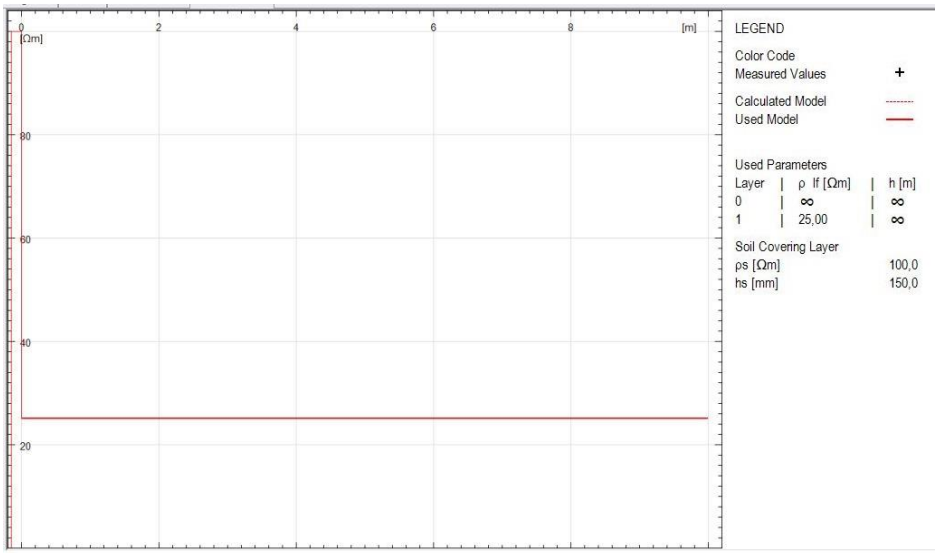
Na slici (Slika 6.26.) se vidi prikaz postrojenja prema kojemu se promatraju sigurna i nesigurna područja s obzirom na napone dodira i koraka u slučaju galvanski spojene ograde. Cijeli prikaz se nalazi u zelenom što govori da je cijelo područje postrojenja i u blizini postrojenja sigurno za kretanje u slučaju pojave struje kvara.




Slika 6.27. Graf napona dodira i koraka uz istočnu ogradu na udaljenosti 1m, ograda galvanski spojena

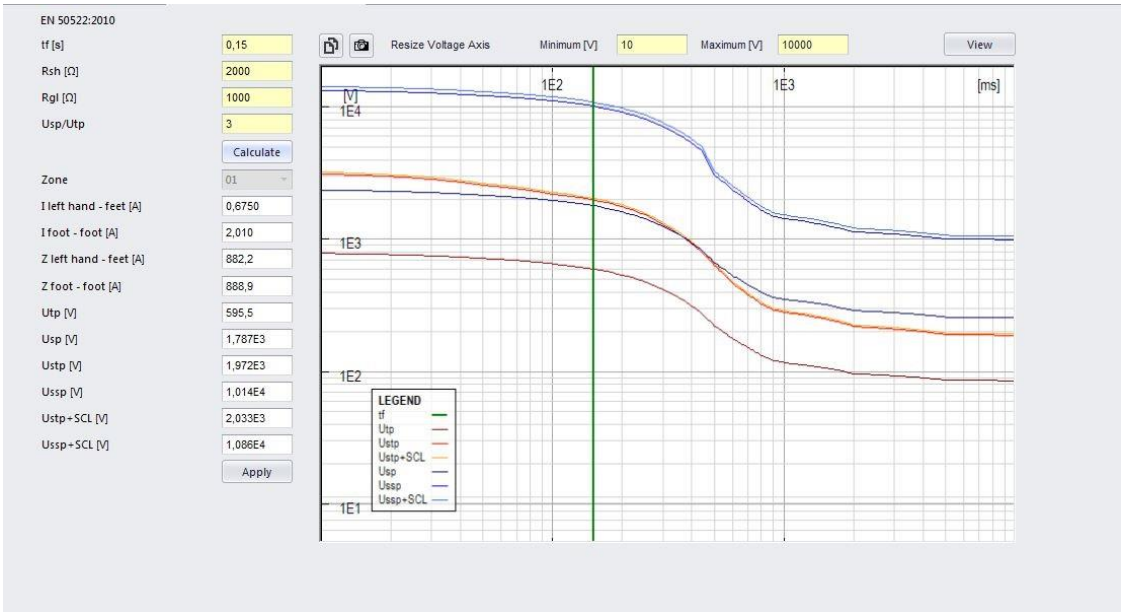
Sa slike (Slika 6.27.) se vide linije (crtkano) dozvoljenih dodirnih napona i napona koraka kada se hoda na udaljenosti 1m uz istočnu ogradu cijelom njezinom duljinom uzimajući u obzir slučaj s galvanski spojenom ogradom. Krivulje koje predstavljaju napon dodira (Ut) i napon koraka (Us) se nalaze daleko ispod dozvoljenih granica iz čega se zaključuje da je područje 1m uz istočnu ogradu sigurno za kretanje.

### 6.2.2. Slučaj jednoslojnog modela tla




Slika 6.28. Grafički prikaz slučaja jednoslojnog tla

Na slici (Slika 6.28.) se vidi grafički prikaz odabranog jednoslojnog tla otpornosti 25 Ωm dobivenog optimiranjem rezultata mjerenja i svođenjem mjerenog dvosloja na ekvivalentni jednosloj . Površinski sloj je prekriven s 150 mm tla otpornosti 100 Ωm.




Slika 6.29. Dopuštene vrijednosti napona dodira i koraka prema europskom standardu

Na slici (Slika 6.29.) se nalazi grafički prikaz dopuštenih vrijednosti napona dodira i koraka za nekoliko slučajeva ako je vrijeme isključenja postavljeno na 150 ms (zelena linija) i uzima se u obzir računanje s jednoslojnim tlom. Uspoređujući slučaj s dvoslojnim tlom i jednoslojnim tlom uzimajući u obzir zaštitne cipele i zaštitne rukavice, nema značajne razlike u naponima dodira odnosno naponima koraka.

### 6.2.2.1. Galvanski odvojena ograda u slučaju jednoslojnog modela tla

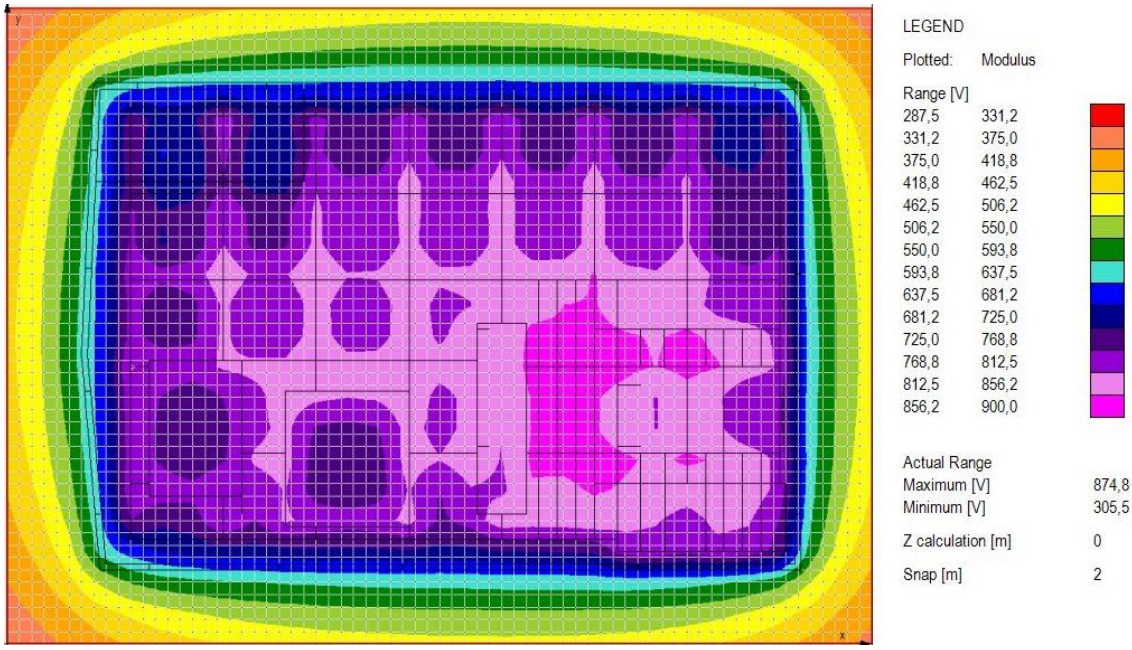
Nakon unosa potrebnih ulaznih podataka, pokreće se simulacija za slučaj jednoslojnog tla.

| Electrode | Electrode Name | \|Je\| [A] | ∠Je [deg] | \|Ue\| [V] | ∠Ue [deg] | \|Ue/ΣJe\| [Ω] | ∠(Ue/ΣJe) [deg] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 6660,000 | 0,000 | 891,407 | 0,000 | 1,338E-01 | 0,000 |
| 2 | 2 | 0,000 | 0,000 | 642,214 | 0,000 | Infinity | 0,000 |

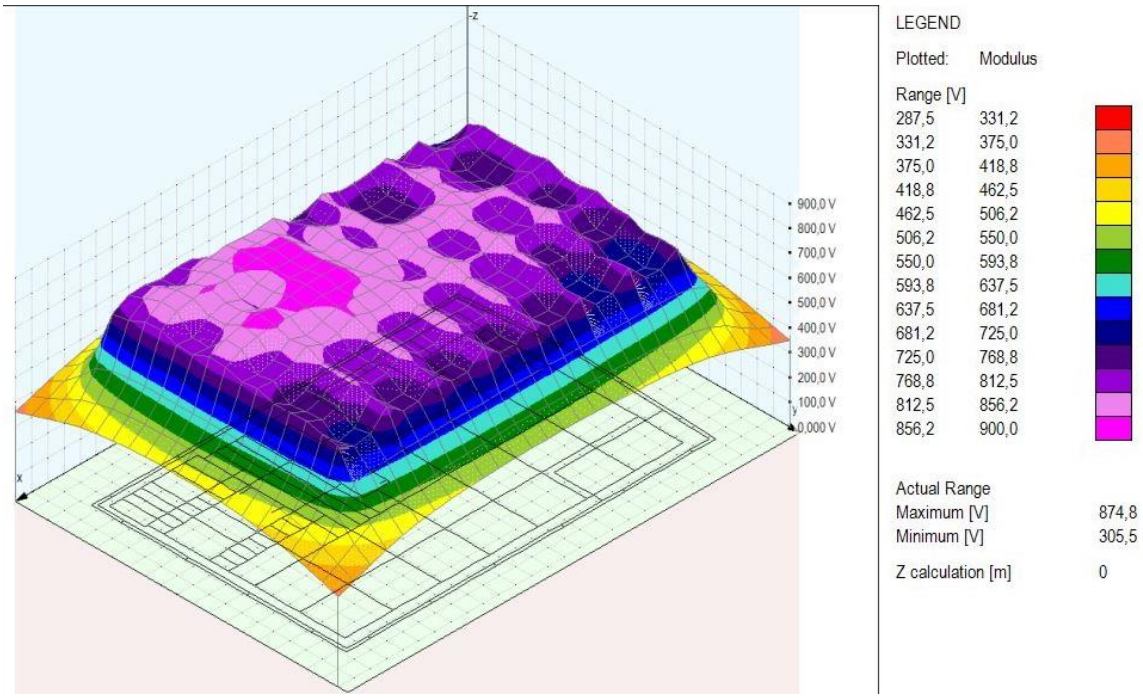
Slika 6.30. Potencijal uzemljivača i otpor uzemljenja

Prolaskom struje veličine 6660 A kroz glavni uzemljivač dolazi do porasta potencijala zemljišta i strukture glavnog uzemljivača dolaze na potencijal od 891 V, a strukture ograde i njezinog uzemljivača dolaze na potencijal od 642 V. Otpor glavnog uzemljivača iznosi 0.1338 Ω.

Uspoređujući dobivene rezultate sa slučajem dvoslojnog tla, može se vidjeti da su potencijali uzemljivača i ograde te otpor uzemljivača veći.

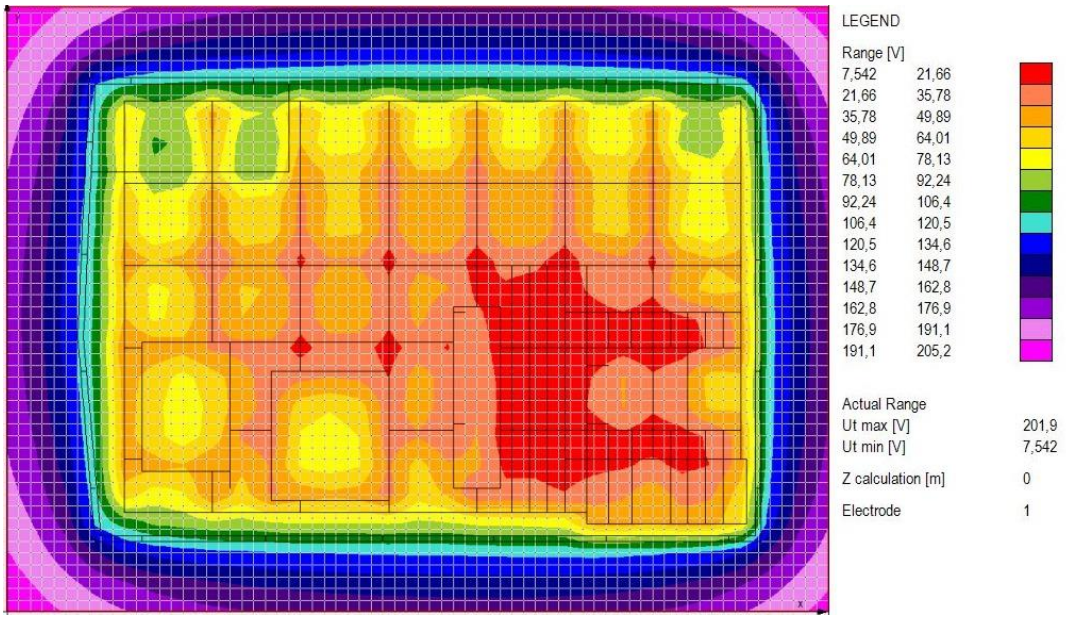



6.31. 2D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski odvojena

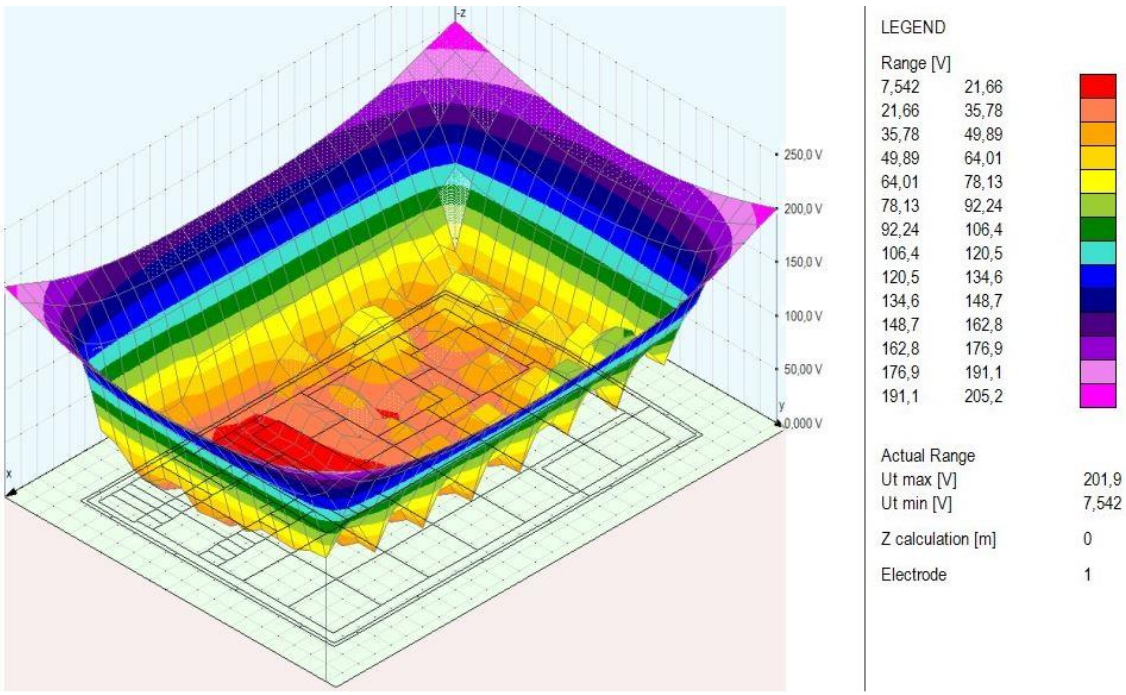



6.32. 3D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski odvojena

Iz slika (Slika 6.31. i Slika 6.32.) se vidi raspodjela potencijala zemljišta kada je ograda galvanski odvojena. Vrijednosti potencijala su za otprilike 150 V veće nego u slučaju s dvoslojnim tlom dok se gradijent potencijala nije značajno promijenio.

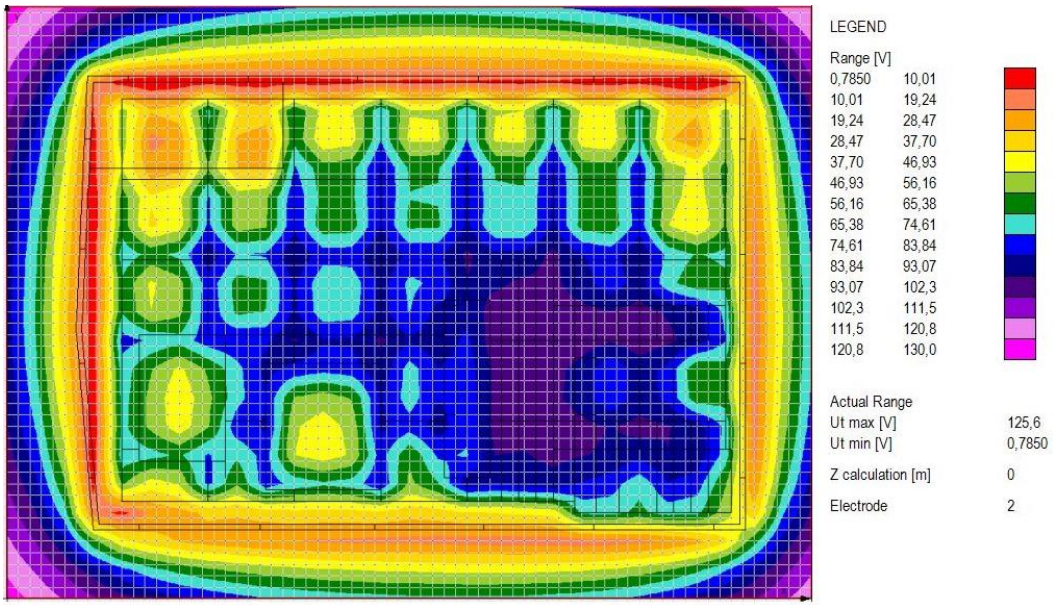



Slika 6.33. 2D prikaz napona dodira, ograda galvanski odvojena

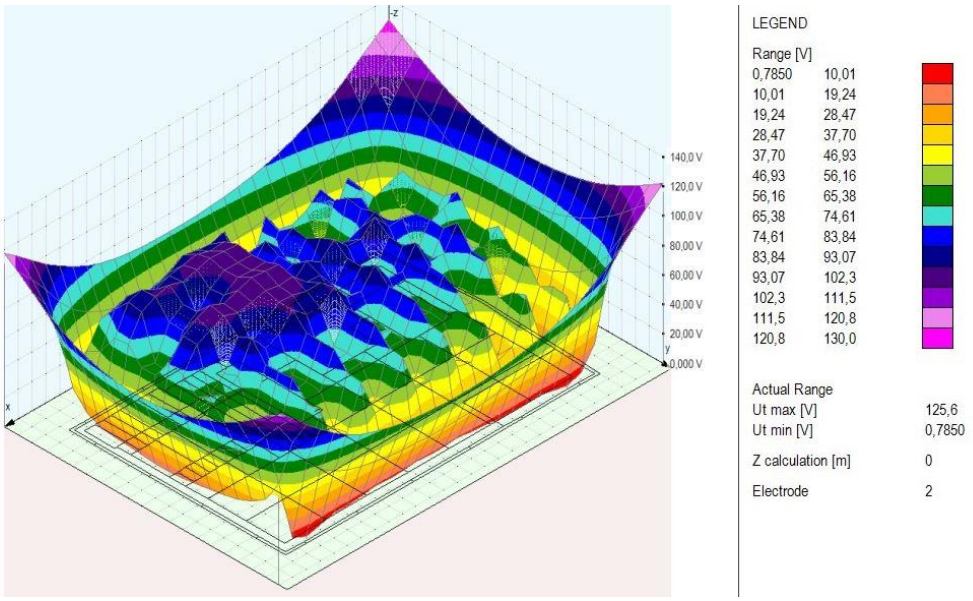



Slika 6.34. 3D prikaz napona dodira, ograda galvanski odvojena

Na slikama (Slika 6.33. i Slika 6.34.) su prikazani naponi dodira kada je ograda galvanski odvojena i kroz glavni uzemljivač teče struja. Uspoređujući gradijente raspodjele potencijala u slučajevima dvoslojnog i jednoslojnog tla, nema nikakve razlike. Jedina razlika je u apsolutnim vrijednostima napona. Naponi dodira u slučaju jednoslojnog tla su veći za gotovo 30 V naspram napona dodira u slučaju dvoslojnog tla. To predstavlja problem u slučajevima iznošenja potencijala izvan postrojenja jer dodirni napon poprima još opasnije vrijednosti.

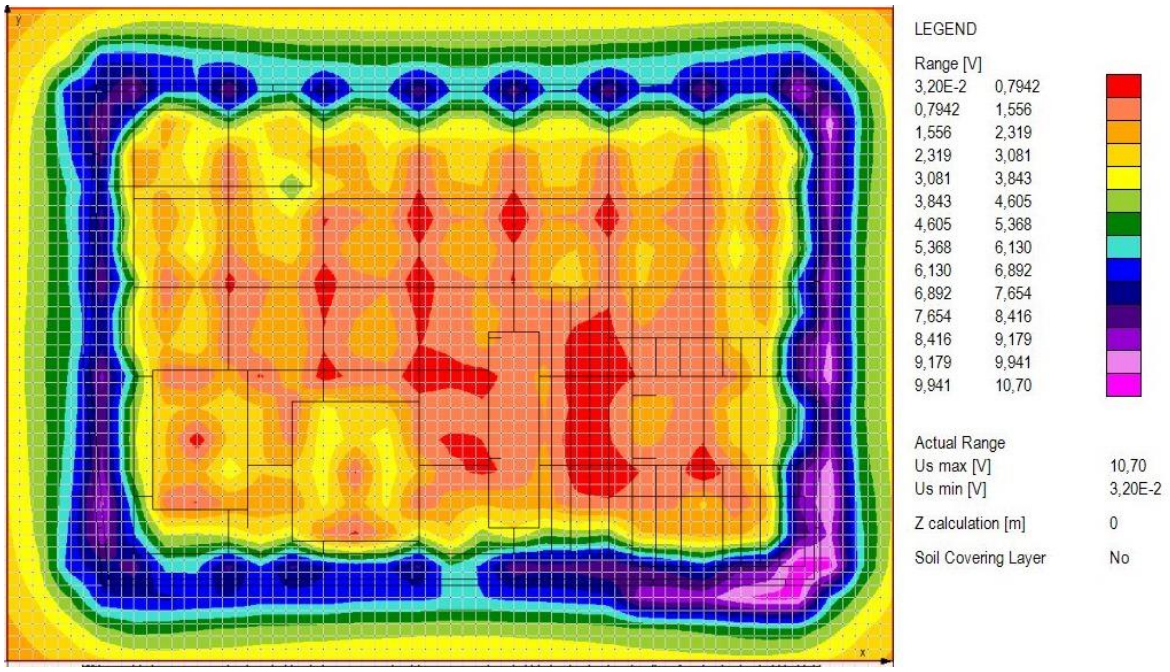



Slika 6.35. 2D prikaz napona dodira s obzirom na ogradu, ograda galvanski odvojena

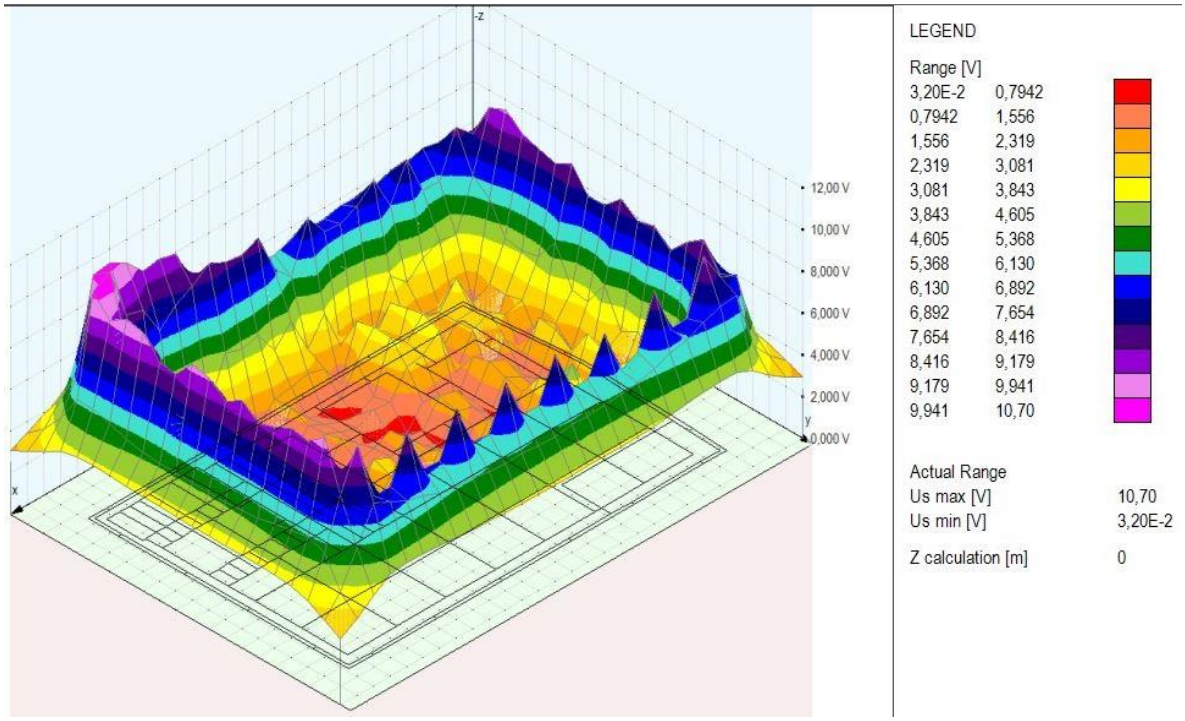



6.36. 3D prikaz napona dodira s obzirom na ogradu, ograda galvanski odvojena

Na slikama (Slika 6.35. i Slika 6.36.) prikazani su naponi dodira s obzirom na ogradu kada je ograda galvanski odvojena i kroz glavni uzemljivač teče struja te ograda poprima potencijal zemlje. Najniži naponi dodira su uz samu ogradu, a najveći dalje od ograde te je jedina razlika naspram napona ograde u slučaju dvoslojnog tla u apsolutnim vrijednostima dodirnog napona koje su veće za gotovo 30 V. Navedena razlika čini situaciju opasnijom za osobu udaljenu više metara od ograde koja može dotaknuti metalnu strukturu koja je galvanski vezana na ogradu ili njezin uzemljivač.

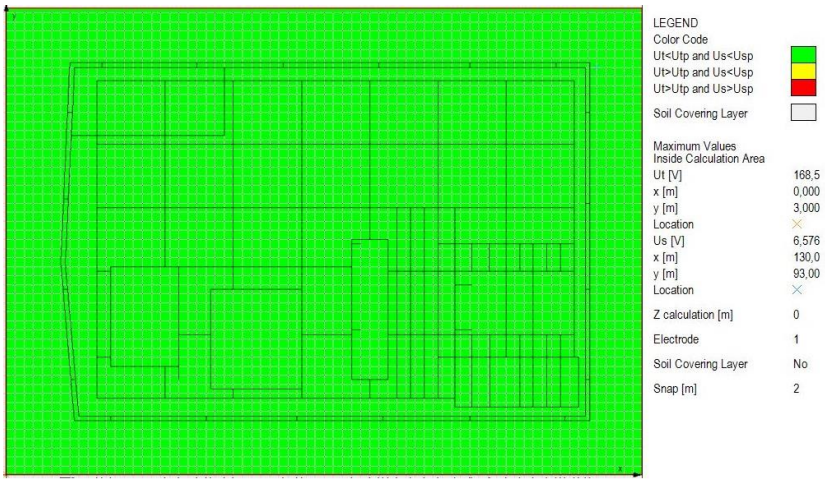



Slika 6.37. 2D prikaz napona koraka, ograda galvanski odvojena



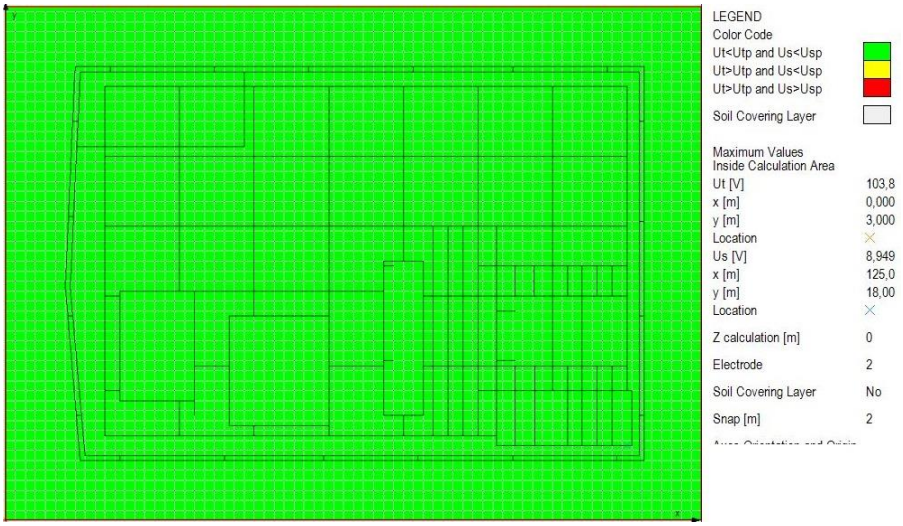

Slika 6.38. 3D prikaz napona koraka, ograda galvanski odvojena

Na slikama (Slika 6.37. i Slika 6.38.) se nalaze prikazi napona koraka kada je ograda galvanski odvojena i kroz glavni uzemljivač teče struja. Uspoređujući slučaj s dvoslojnim tlom i slučaj s jednoslojnim tlom, nema značajne razlike u gradijentu raspodjele potencijala. Jedina razlika je u većim vrijednostima napona za gotovo 2V u slučaju jednoslojnog modela tla, što je zanemarivo.



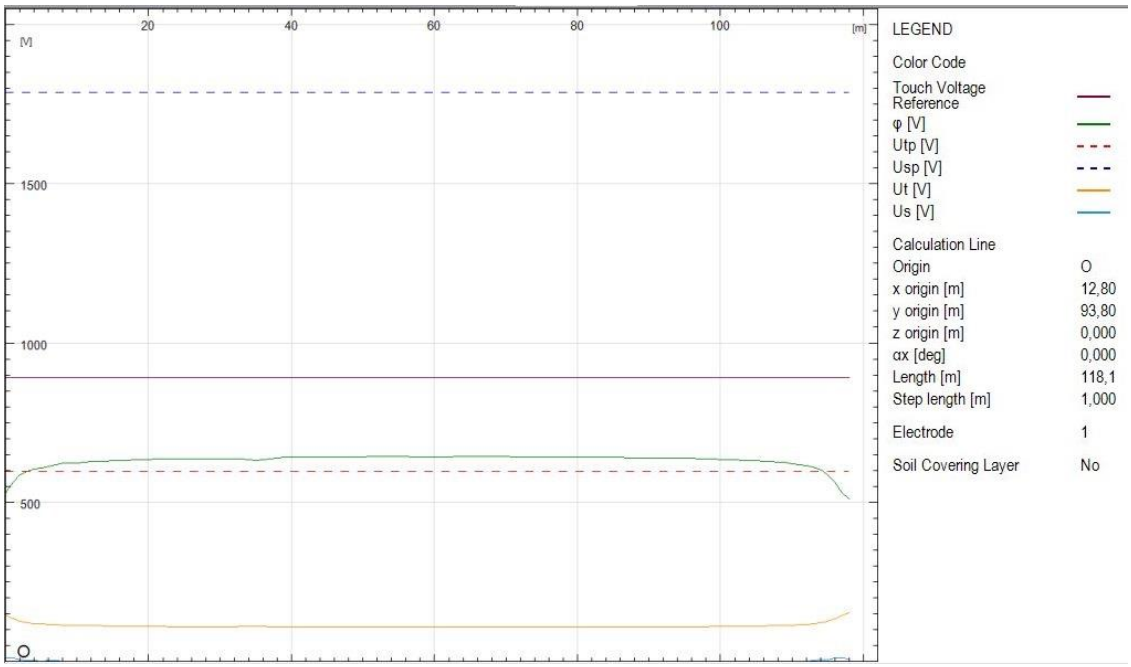

Slika 6.39. Prikaz sigurnih područja unutar i van postrojenja s obzirom na napone dodira i koraka

Na slici (Slika 6.39.) se vidi prikaz postrojenja prema kojemu se promatraju sigurna i nesigurna područja s obzirom na napone dodira i koraka u slučaju galvanski odvojene ograde, a referentna struktura je glavni uzemljivač. Cijeli prikaz se nalazi u zelenom što govori da je cijelo područje postrojenja i u blizini postrojenja sigurno za kretanje u slučaju pojave struje kvara.




Slika 6.40. Prikaz sigurnih područja unutar i van postrojenja s obzirom na napone dodira i koraka, a referentna struktura je ograda postrojenja

Na slici (Slika 6.40.) se vidi prikaz postrojenja prema kojemu se promatraju sigurna i nesigurna područja s obzirom na napone dodira i koraka u slučaju galvanski odvojene ograde, a referentna struktura je ograda postrojenja na vlastitom uzemljivaču. Bez obzira na veće apsolutne vrijednosti napona u slučaju jednoslojnog tla, cijeli prikaz se nalazi u zelenom što govori da je cijelo područje postrojenja i u blizini postrojenja sigurno za kretanje u slučaju pojave struje kvara.




Slika 6.41. Graf napona dodira i koraka uz istočnu ogradu na udaljenosti 1m, ograda galvanski odvojena

Sa slike (Slika 6.41.) se vide linije (crtkano) dozvoljenih dodirnih napona i napona koraka kada se hoda na udaljenosti 1m uz istočnu ogradu cijelom njezinom duljinom. Krivulje koje predstavljaju napon dodira (Ut) i napon koraka (Us) se nalaze daleko ispod dozvoljenih granica, bez obzira na veće apsolutne vrijednosti napona u slučaju jednoslojnog tla, iz čega se zaključuje da je područje 1m uz istočnu ogradu sigurno za kretanje.

### 6.2.2.2. Galvanski spojena ograda u slučaju jednoslojnog modela tla

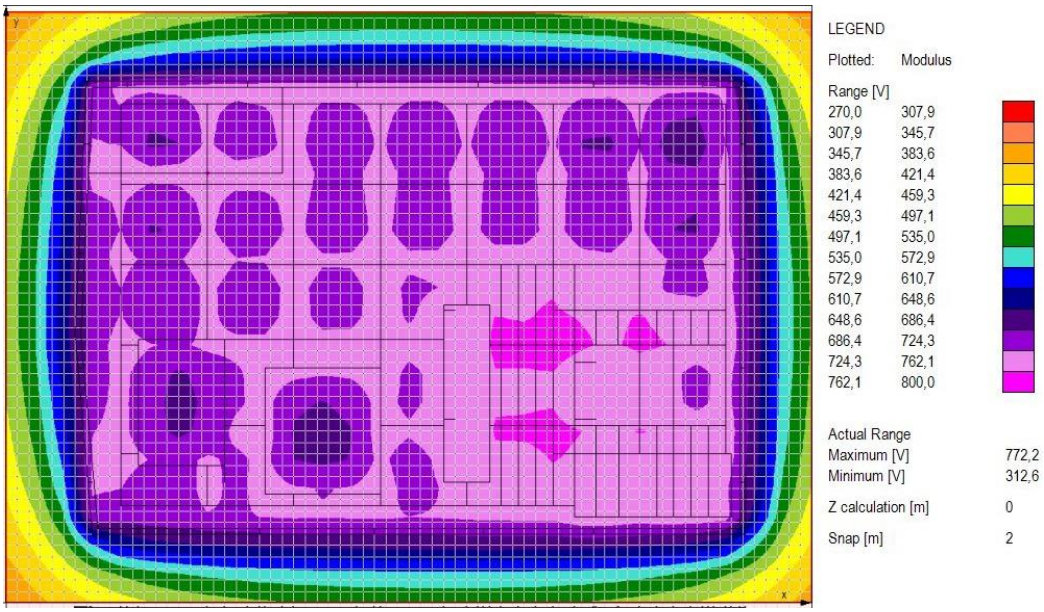
Sljedeći promatrani slučaj na jednoslojnom tlu je galvansko spajanje ograde na glavni uzemljivač.

| Electrode | Electrode Name | \|Je\| [A] | ∠Je [deg] | \|Ue\| [V] | ∠Ue [deg] | \|Ue/ΣJe\| [Ω] | ∠(Ue/ΣJe) [deg] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 1 | 6660,000 | 0,000 | 784,839 | 0,000 | 1,178E-01 | 0,000 |

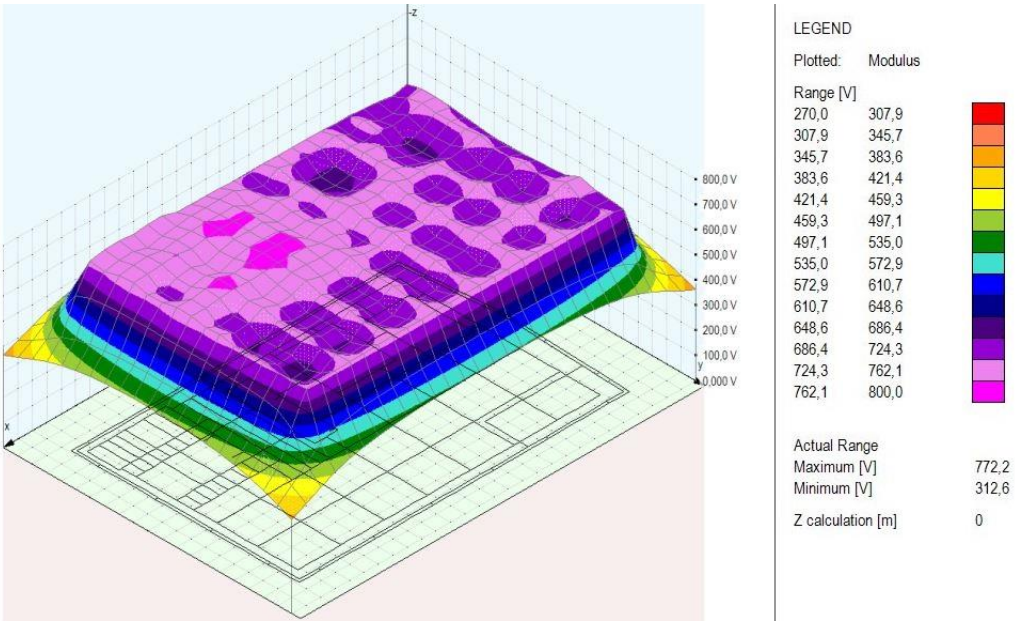
Slika 6.42. Potencijal spojenog uzemljivača i otpor uzemljenja

Prolaskom struje veličine 6660 A kroz uzemljivač dolazi do porasta potencijala zemljišta, a strukture glavnog uzemljivača te strukture ograde i njezinog uzemljivača dolaze na potencijal od 785 V. Otpor kombiniranog uzemljivača iznosi 0.178 Ω što je manje naspram slučaja s galvanski odvojenom ogradom, što je bilo i očekivano zbog povećanja ukupne duljine uzemljivača.

Dobivene vrijednosti su veće ako se uspoređuju s vrijednostima kod dvoslojnog modela tlo i to za oba slučaja, odnosno galvanski odvojene ograde te galvanski spojene ograde.

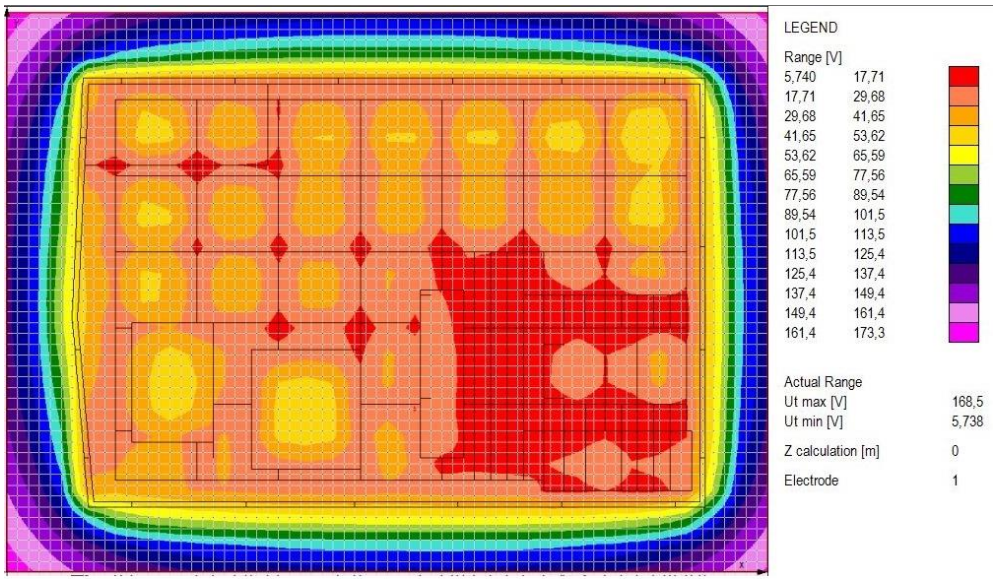



Slika 6.43. 2D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski spojena

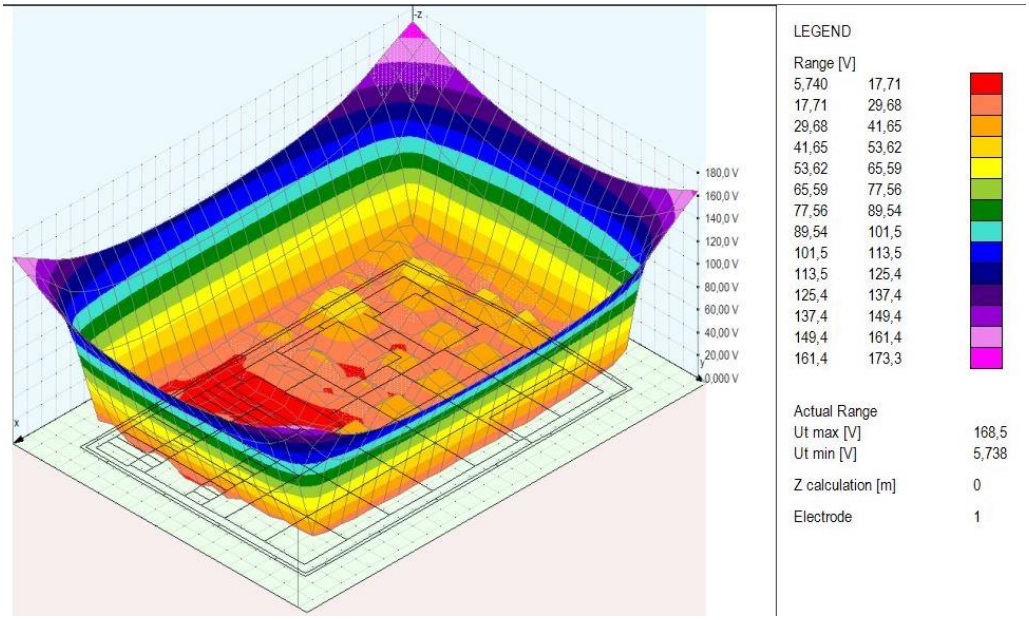



Slika 6.44. 3D prikaz raspodjele potencijala zemljišta, ograda galvanski spojena

Najveći potencijal zemljišta je manji naspram slučaja galvanski odvojene ograde i u ovom slučaju ograda je poprimila potencijal glavnog uzemljivača kao što je vidljivo na slikama (Slika 6.43. i Slika 6.44.). Za razliku od dvoslojnog modela tla, i to za oba slučaja galvanski spojene te galvanski odvojene ograde, apsolutne vrijednosti napona su i u ovom slučaju veće.

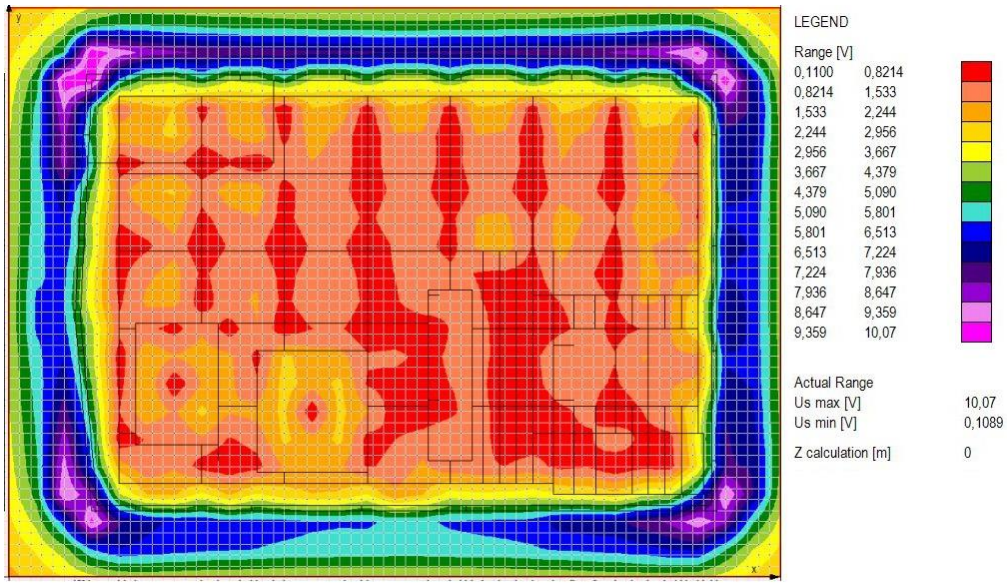



Slika 6.45. 2D prikaz napona dodira, ograda galvanski spojena

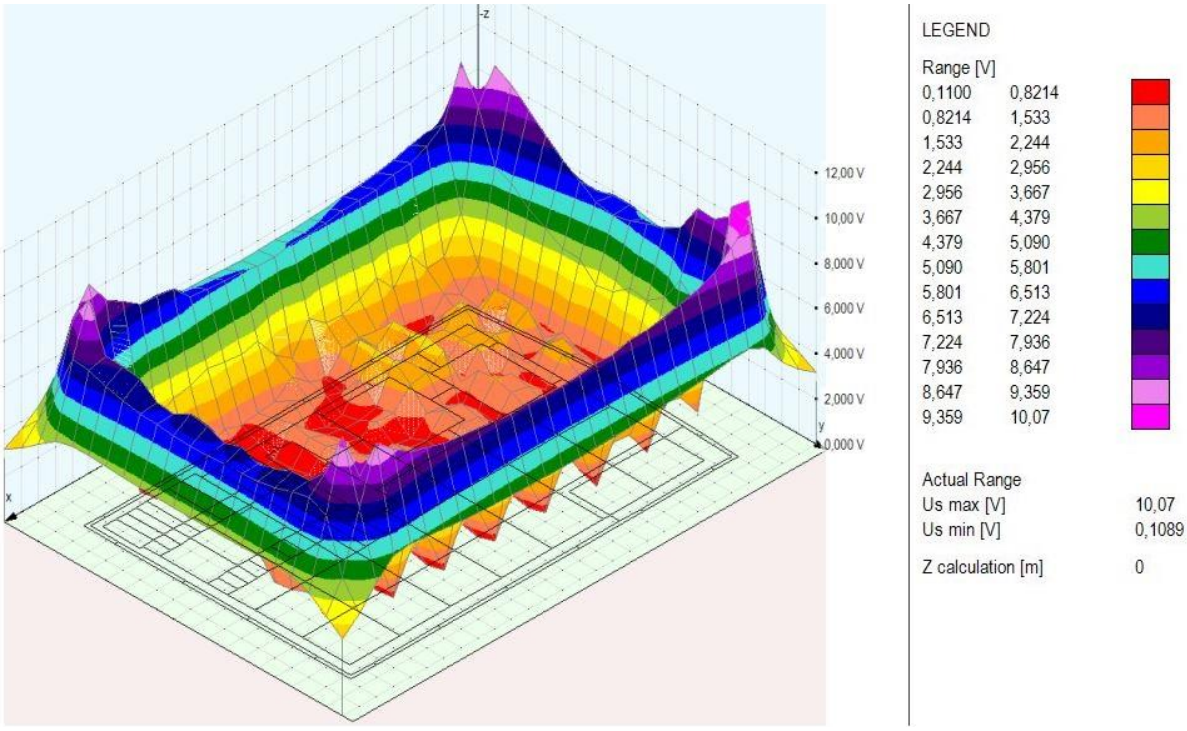



Slika 6.46. 3D prikaz napona dodira, ograda galvanski spojena

Na slikama (Slika 6.45. i Slika 6.46.) u slučaju galvanski spojene ograde na glavni uzemljivač, naponi dodira imaju manje apsolutne vrijednosti, nego što su imali u slučaju galvanski odvojene ograde, a veće apsolutne vrijednosti u odnosu na galvanski spojenu ogradu na dvoslojnom tlu. Gradijent raspodjele potencijala je malo strmiji uz ogradu i rubove ograde van postrojenja naspram galvanski odvojene ograde te može predstavljati potencijalan problem za napone dodira. Također postoji i opasnost od iznošenja potencijala koji može poprimiti opasne vrijednosti na svega nekoliko metara izvan postrojenja.

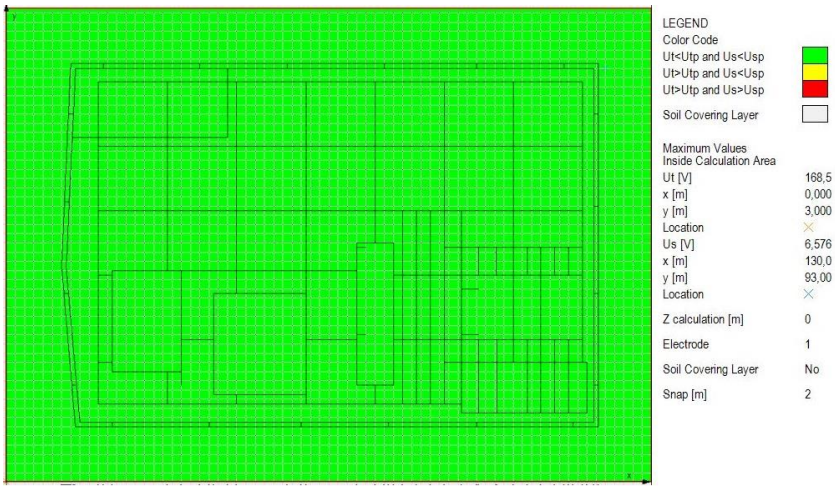



Slika 6.47. 2D prikaz napona koraka, ograda galvanski spojena



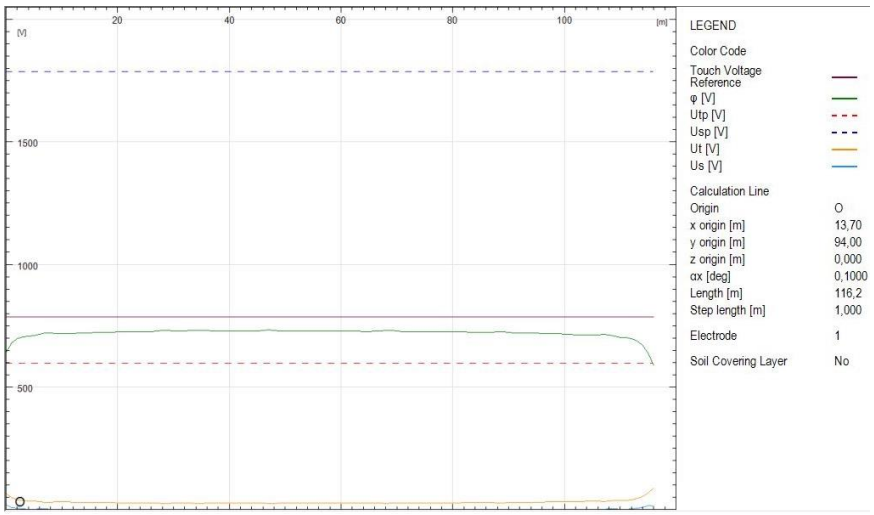

Slika 6.48. 3D prikaz napona koraka, ograda galvanski spojena

Gledajući slike (Slika 6.48. i 6.49.), naponi koraka su najveći uz kutove ograde postrojenja, no i dalje poprimaju vrlo blage i bezopasne vrijednosti uspoređujući galvanski spojenu i galvanski odvojenu ogradu za slučaj jednoslojnog modela tla.




Slika 6.49. Prikaz sigurnih područja unutar i van postrojenja s obzirom na napone dodira i koraka

Na slici (Slika 6.49.) se vidi prikaz postrojenja na kojemu se promatraju sigurna i nesigurna područja s obzirom na napone dodira i koraka u slučaju galvanski spojene ograde. Cijeli prikaz se nalazi u zelenom što govori da je cijelo područje postrojenja i u blizini postrojenja sigurno za kretanje u slučaju pojave struje kvara. Prikaz je identičan kao u svim prethodnim slučajevima.




Slika 6.50. Graf napona dodira i koraka uz istočnu ogradu na udaljenosti 1m, ograda galvanski spojena

Na slici (Slika 6.50.) se vide linije (crtkano) dozvoljenih dodirnih napona i napona koraka kada se hoda na udaljenosti 1m uz istočnu ogradu cijelom njezinom duljinom uzimajući u obzir slučaj s galvanski spojenom ogradom. Krivulje koje predstavljaju napon dodira (Ut) i napon koraka (Us) se nalaze daleko ispod dozvoljenih granica iz čega se zaključuje da je područje 1m uz istočnu ogradu sigurno za kretanje. Rezultati su gotovo identični slučaju galvanski spojene ograde na dvoslojnom tlu, osim povećanog potencijala u slučaju jednoslojnog tla.

# 6. ZAKLJUČAK

Provedbom simulacije u XGSLabu i analizom dobivenih podataka za visokonaponsko postrojenje za nekoliko slučajeva, može se vidjeti da se vrijednost napona koraka i napona dodira za sve prikazane slučajeve nalaze u dozvoljenim granicama prema zadanom standardu. Konstruiranje i izvedba visokonaponskog postrojenja nije lagan zadatak te se mora uzeti u obzir jako puno parametara kao što su vremenski uvjeti, vrsta i slojevitost tla, kompleksnost elektroenergetskog sustava, velika količina električkih vrijednosti, navike ljudi, ekonomičnost itd. Tokom izvođenja postrojenja, neke vrijednosti su bile aproksimirane te u analizi uspoređene da se vidi odstupanje postupka aproksimacije, ali bez obzira na to, dobivene vrijednosti su se nalazile u sigurnim granicama. Neki parametri nisu mogli biti precizno uneseni u program pa su izostavljeni, kao što su dijelovi unutar i van postrojenja koji su asfaltirani i posuti šljunkom što još dodatno daje na sigurnosti od visokih napona dodira i koraka. Na mjestima gdje se nalaze veći gradijenti raspodjele potencijala kao što je npr. u blizini ograde, nalaze se dodatno oblikovani potencijalni lijevci, postavljene su dodatne zaštite u obliku izolacijskih materijala te vizualnih upozorenja i fizičkih barijera jer je ljudski život na prvom mjestu i inženjeri su bili vrlo pažljivi u izvedbi postrojenja. Ograda je galvanski odvojena od glavnog uzemljivača da se smanji gradijent raspodjele potencijala u blizini ograde jer se postrojenje nalazi u naseljenoj sredini gdje ljudi svakodnevno često prolaze. Da bi sve funkcioniralo kako treba, održavaju se redovni pregledi i remonti postrojenja koji su i zakonom obvezni. Dakle, može se zaključiti da je promatrano visokonaponsko postrojenje 110/10 kV sigurno za rad i boravak unutar postrojenja poštivajući mjere sigurnosti.

# LITERATURA

[1] F. Majdandžić, Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Graphis, Zagreb, 2004.

[2] G. Knežević, Uzemljivači i sustavi uzemljenja, materijali s predavanja, FERIT Osijek, 2021.

[3] G. Knežević, Elektroenergetska postrojenja, materijali s predavanja, FERIT Osijek, 2020.

[4] H. Požar, Visokonaponska rasklopna postrojenja, Tehnička knjiga, Zagreb, 1967.

[5] A. Morstad, Uzemljenje vanjskog visokonaponskog postrojenja, 2012. dostupno na:

https://core.ac.uk/download/pdf/30864089.pdf,pristupljeno:23.8.2021.

[6] Video tutorijal za rad u programskom alatu XGSLab, dostupno na:

https://www.easypower.com/resources/article/xgslab-gsa-en-tutorial-2,pristupljeno: 5.9.2021.

[7] I. Tolić, Održavanje uzemljivača visokonaponskih transformatorskih stanica, dostupno na: https://www.researchgate.net/publication/280010535_Maintenance_of_grounding_in_high_voltage_substations_in_line_with_Ordinance_on_technical_requirements_for_power_system_substations_with_nominal_ac_voltage_above_1_kV, pristupljeno: 24.8.2021.

[8] Službena stranica programskog alata XGSLab, dostupno na:

https://www.xgslab.com/, pristupljeno: 5.9.2021.

[9] Slika tipičnog štapnoguzmeljivača ukopanog u tlo, dostupno na: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/7/7d/HomeEarthRodAustralia1.jpg/1200px-HomeEarthRodAustralia1.jpg, pristupljeno:25.8.2021.

[10] Slika prolaska struje kroz sustav uzemljenja, dostupno na: https://colguvenliksistemleri.com/wp-content/uploads/2020/09/Topraklama-Nedir-Neden-%C3%96nemlidir-%C3%87e%C5%9Fitleri-Nelerdir.jpg, pristupljeno: 25.8.2021.

[11] Propisana pravila zaštite na radu za smanjenje rizika od udara električne struje, dostupno na: https://zastitanaradu.com.hr/novosti/Propisana-pravila-zastite-na-radu-za-smanjenje-rizika-od-udara-elektricne-struje-34, pristupljeno: 26.8.2021.

[12] Ž. Radošević, Izvedbeni projekt TS 110/10 kV Osijek 3, Zagreb, 1994.

# SAŽETAK

U diplomskom radu teorijski su obrađeni pojmovi otpora rasprostiranja, napona koraka, dodirnog napona i uzemljenja nadalje, dane su osnovne podjele uzemljivača i sustava uzemljenja. Objašnjeni su utjecaji struje na ljudsko tijelo i sigurnost tokom rada u blizini električnih komponenti. Opisano je mjerenje otpora uzemljenja visokonaponskog postrojenja. U drugom dijelu rada uneseni su parametri i shema postrojenja u program XGSLab u kojemu se simuliralo i zatim analiziralo nekoliko različitih slučajeva. Analiza je uključivala napone dodira, napone koraka, potencijal zemljišta, problematična područja uz ogradu i cjelokupnu sigurnost postrojenja.

Ključne riječi: dodirni napon,napon koraka, otpor rasprostiranja, visokonaponsko postrojenje, uzemljenje, XGSLab

## ABSTRACT

In this master's thesis terms such as earth grounding resistance, step voltage, touch voltage and grounding are theoretically explained, furthermore basic classifications of grounding conductors and grounding systems are given. Electrical current's influence on human body is explained and safety in working around electrical components is explained. Measurement of earthing resistance in a high voltage substation is described. In the second part of this master's thesis parameters and scheme of the substation are imported into XGSLab program in which few different cases were simulated and then analyzed. Analysis included touch voltages, step voltages, ground potential, problematic areas next to the fence and global safety of the substation.



Keywords: touch voltage, step voltage, earth grounding resistance, high voltage substation, grounding, XGSLab

# ŽIVOTOPIS

Dominik Kuric rođen je 3. kolovoza 1996. u Osijeku. Osnovnu školu pohađao je u Osijeku u Osnovnoj školi Vladimira Becića gdje je prošao svih 8 razreda s odličnim uspjehom. Upisao se u III. gimnaziju u Osijeku i maturirao 2015. godine. Iste godine upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija koji se tada zvao Elektrotehnički fakultet Osijek. Na drugoj godini studija odabire izborni blok elektroenergetike. 2019. godine postaje sveučilišni prvostupnik inženjer elektrotehnike i informacijske tehnologije te iste godine upisuje prvu godinu diplomskog sveučilišnog studija elektrotehnike, modul DEA - Elektroenergetski sustavi.