

# Analiza induciranih napona metalnih ograda ispod vodiča dalekovoda

---

**Protić, Tomislav**

**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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:200:250434>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-02-08**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA INDUCIRANIH NAPONA METALNIH  
OGRADA ISPOD VODIČA DALEKOVODA**

**Diplomski rad**

**Tomislav Protić**

**Osijek, 2021. godina**

# SADRŽAJ

1. UVOD.....	1
1.1. Zadatak diplomskog rada .....	1
2. PREGLED LITERATURE .....	2
3. UTJECAJ DALEKOVODA NA METALNU MASU .....	3
3.1. Kapacitivni spoj .....	4
3.2. Induktivni spoj.....	5
3.3. Otporni spoj .....	8
4. PRAVILNICI I NORME.....	11
4.1. Izloženost elektromagnetskim poljima .....	11
4.2. Dopušteni napon dodira i koraka.....	14
5. SIMULACIJA.....	16
5.1. Model mreže .....	17
5.2. Slučaj normalnog pogona .....	21
5.2.1. Neuzemljena ograda pri normalnom pogonu.....	21
5.2.2. Uzemljena ograda pri normalnom pogonu.....	25
5.3. Slučaj kratkog spoja .....	28
5.3.1. Neuzemljena ograda pri kratkom spoju.....	29
5.3.2. Uzemljena ograda pri kratkom spoju.....	33
6. ZAKLJUČAK .....	39
7. SAŽETAK .....	41
8. ABSTRACT.....	42
9. LITERATURA .....	43
10. ŽIVOTOPIS .....	45

## **1. UVOD**

Za dalekovode prijenosnog sustava važan je aspekt sigurnosti s obzirom na njihov utjecaj na okolinu. U okolinama gdje se dalekovodi postavljaju uvijek će postojati nekakve metalne mase koje u interferenciji s vodovima dalekovoda mogu stvarati opasnost za čovjeka. Kao primjer takvog slučaja su metalne ograde koje se nalaze u blizini dalekovoda koje ograđuju nečija imanja ili pak metalna ograda trafostanice. Iznosi elektromagnetskih smetnji koje stvaraju vodovi dalekovoda na metalnim ogradama ovisi o geometrijskim parametrima vodova dalekovoda i metalne ograde (duljina, visina, provjes i presjek vodiča) te o električnim karakteristikama (iznos napona i struje, izvedba sustava uzemljenja, otpornost tla i sl.). Smetnje se stvaraju pri normalnim pogonskim uvjetima, ali i pri kratkom spoju na dalekovodu. Ovisno je li ograda uzemljena ili ne, mogu se stvoriti opasne situacije za ljudski život. Ovakav tip sustava može stvarati povećanje potencijala na metalnim ogradama, ali u isto vrijeme se može stvoriti pojačano elektromagnetsko polje koje je također štetno za čovjeka. U svrhu toga potrebno je smanjiti inducirane napone na ogradama i iznose elektromagnetskih polja na iznose koje su propisani prema zakonskim pravilnicima o sigurnosti ljudi. Simulacijama u XGSLab programu je potrebno odrediti iznose napona i elektromagnetskih polja za slučaj neuzemljene ograde i projektirati uzemljenje kako bi ograda postala sigurna za dodir u bilo kojem trenutku.

### **1.1. Zadatak diplomskog rada**

U diplomskom radu potrebno je objasniti induciranje napona na metalnim ogradama koje se nalaze ispod vodiča dalekovoda. Nadalje, potrebno je izraditi računalni model u kojem će se analizirati vrijednosti induciranih napona na metalnoj ogradi koja se nalazi ispod dalekovoda za različite konfiguracije i međusobne udaljenosti ograde i vodiča dalekovoda.

## 2. PREGLED LITERATURE

Literatura [1] prikazuje sliku dvosistenskog 400 kV dalekovoda koji je izveden u obliku 'bačve'. Literatura [2] objašnjava utjecaj visokonaponskih dalekovoda na obližnje metalne mase i kako se podjeljuju utjecaji na metalne mase, ovisno o tipu nastanka spoja smetnje (kapacitivni, induktivni i otporni). Detaljniji opis kapacitivnog spoja (elektrostatičke indukcije) i njegovih smetnji u obližnju metalnu masu su opisani unutar literature [3]. Princip rada i shema nadomjesne mreže induktivnog spoja je prikazana u literaturi [4], dok učinak induktivnog spoja, odnosno elektromagnetske indukcije na metalne mase je detaljnije objašnjeno literaturom [5]. Kako slučaj dozemnog kratkog spoja utječe na porast potencijala zbog porasta potencijala okolnog zemljišta opisano je unutar literature [6] koja detaljno objašnjava matematički proračun otpornog spoja između vodiča dalekovoda i metalne ograde. Izloženost ljudskog tijela na elektromagnetska polja izaziva razne zdravstvene tegobe i probleme, a osnovne stvari i problemi izloženosti elektromagnetskim poljima su opisani literaturom [7]. Unutar literature [8]-[10] su opisani propisani zakoni i norme o zaštiti čovjeka od elektromagnetskim polja u javnim područjima, područjima povećane osjetljivosti te područja profesionalne izloženosti. Literatura [11]-[12] opisuje dozvoljene vrijednosti napona dodira i napona koraka.

### 3. UTJECAJ DALEKOVODA NA METALNU MASU

Elektroenergetski sustav je složeni sustav koji ima svrhu pouzdane i kvalitetne opskrbe električnom energijom krajnjih kupaca. Sastoji se od 4 glavne komponente: proizvodnje, prijenosa, distribucije te potrošnje. Proizvodnju čine različiti oblici elektrana koje pretvaraju druge oblike energije u električnu energiju. Elektrane proizvode velike količine energije koja je potrebna na drugim lokacijama, stoga je energiju potrebno prenijeti pomoću prijenosa i distribucije. Ovisno o razini napona u mreži, mreža se može podijeliti na prijenosnu i distribucijsku mrežu. U Hrvatskoj za prijenosnu mrežu se koriste naponske razine od 110, 220 i 400 kV, dok se za distribuciju koristi 10, 20 i 35 kV. Glavni dijelovi prijenosa i distribucije su transformatori koji transformiraju napon na određenu naponsku razinu i vodovi, koji mogu biti nadzemni vod ili podzemni kabel. Dalekovod je zapravo elektroenergetski nadzemni vod koji ima zadaću prijenosa energije velikih količina često na velike udaljenosti. Dalekovod sačinjavaju vodiči, izolatori, stup dalekovoda, zaštitno uže i ostali pomoćni dijelovi. Wodiči dalekovoda najčešće se izrađuju od *alučel*, upletene izvedbe aluminijskih i čeličnih žica. Aluminij je vanjski materijal koji zbog *skin-efekta* provodi većinu energije, dok je čelik unutarnji element kojemu je svrha poboljšanje mehaničkih svojstva vodiča. Radi uštede prostora, često se prijenosni dalekovodi rade u dvosistenskoj izvedbi, gdje stup dalekovoda sa svake strane ima jedan sustav faza. Time se povećava prijenosna snaga dalekovoda. Na slici 3.1. je prikazan primjer stupa dvosistenskog 400 kV dalekovoda u izvedbi “bačve”.



Slika 3.1. Stup dvosistenskog 400 kV dalekovoda [1]

Dalekovodi se većinom postavljaju na izvangradska mjesta gdje nema velike populacije ljudi, kao što su oranice, šume, uz prometnice i slično. No, na njihovom koridoru mogu se naći kojekakve metalne mase kojima će dalekovod prouzrokovati električne smetnje.

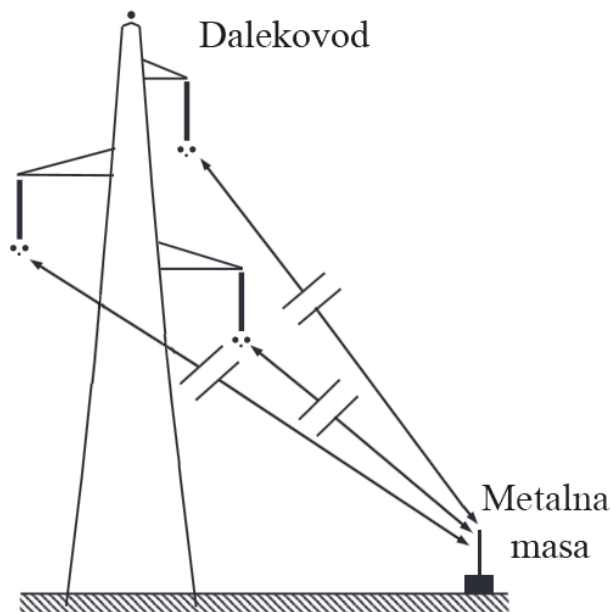
Jedni od čestih primjera koji se nalaze u blizini dalekovoda su metalni cjevovodi i metalne ograde. Cjevovodi se postavljaju u takvoj blizini radi propisa o zaštiti okoliša, ali i zbog jednostavnosti i zbog smanjenja troškova zbog izvođenja novog koridora. S druge strane, metalne ograde se postavljaju u ograđivanju svih trafostanica radi ograničavanja pristupa neovlaštenih ljudi u takva postrojenja, te zbog ograničenja ulaska životinja. Također, dalekovod može se susresti sa metalnim ogradama ako se nalazi u blizini privatnog posjeda, kao što su kuće, vikendice i slična imanja. Ovisno o blizini dalekovoda, izložene metalne ograde mogu prouzročiti opasnost za ljudski život.

Prema literaturi [2], dalekovod može utjecati na metalnu masu koja se nalazi u neposrednoj blizini na tri načina:

- kapacitivni spoj (elektrostatska indukcija)
- induktivni spoj (elektromagnetska indukcija)
- otporni spoj

### **3.1. Kapacitivni spoj**

Kapacitivni spoj se stvara između bilo kojih metalnih masa koje nisu uzemljene i nalaze se u neposrednoj blizini voda dalekovoda kroz kojeg teče struja. Prolaskom struje stvara se električno polje koje prouzrokuje povećanje potencijala metalne mase. Kapacitivni spoj nastaje i pri normalnim pogonskim uvjetima i u uvjetima kvara. Prikaz kapacitivnog spoja prikazan je na slici 3.2.



Slika 3.2. Kapacitivni spoj između dalekovoda i metalne mase [3]

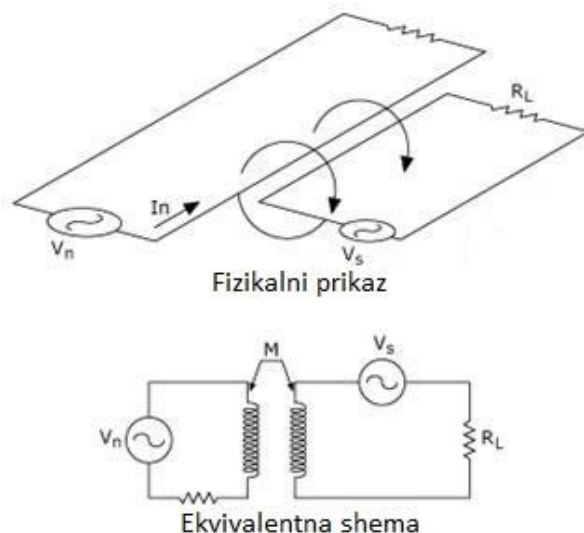
Iznos potencijala metalne mase ovisi o iznosu napona vodova dalekovoda, o veličini metalne mase, o njenoj blizini s obzirom na dalekovod i postoji li izolacija na toj metalnom objektu. Ako postoji izolacija, kapacitet između metalne mase i vodova dalekovoda može biti većeg iznosa i time uzrokovati veći porast potencijala. U slučaju dobre izolacije na relativno velikim metalnim masama u velikom električnom polju vodova dalekovoda, moguća je pojava električnog pražnjenja prilikom ljudskog dodira. To je mogući slučaj kod automobila parkiranih u blizini dalekovoda. Slučaj električnog pražnjenja kod automobila se ne smatra opasnim, no kod neuzemljenih masa kao što su cjevovodi i metalne ograde, njihovi iznosi elektrostatskog potencijala može biti opasan.

Opasnost od mogućih elektrostatskih potencijala se može riješiti pravilnim uzemljenjem.

### 3.2. Induktivni spoj

U elektrotehnici, induktivni spoj se smatra spojem dvaju strujnih krugova tako da promjenjiv iznos struje u jednom strujnom krugu stvara promjenjivo magnetsko polje koje obuhvaća drugi strujni krug, u kojemu se inducira napon. Primjer induktivnog spoja je prikazan na slici 3.3.

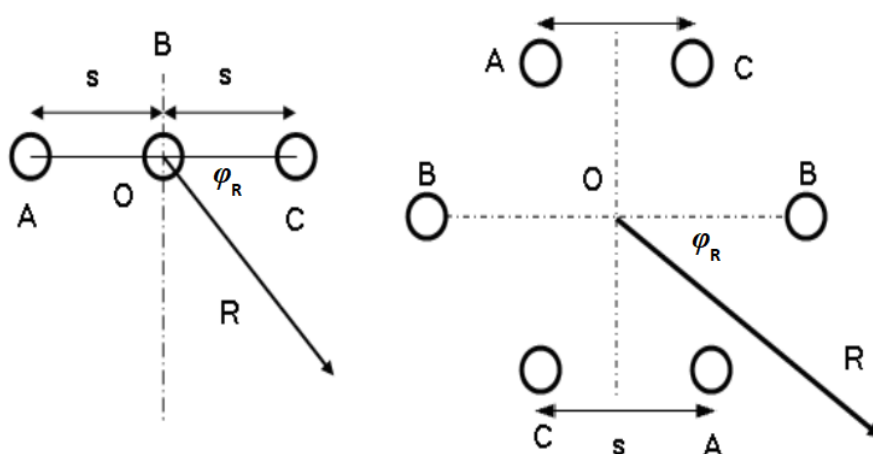




Slika 3.3. Fizikalni prikaz i ekvivalentna shema induktivnog spoja dvaju strujnih krugova [4]

Induktivni spoj se stvara u situacijama kada je to nepoželjno, kao što je induktivni spoj metalne mase sa vodovima dalekovoda. Dalekovodi stvaraju vremenski promjenjivo magnetsko polje. To magnetsko polje je ovisno o iznosu struje u zadanom trenutku, stoga induktivni spoj se može pojaviti samo kod AC dalekovoda, tj. ne postoji mogućnost induktivnog spoja kod HVDC sustava i metalne mase.

Iznos magnetske indukcije koju stvaraju vodovi dalekovoda ovisi o geometriji rasporeda vodova. Dalekovod se može sastojati od 3 fazna vodiča koji su postavljeni horizontalno, ili ako se radi o dvosistemskom dalekovodu, tada se sastoji od 6 vodova. Konfiguracije ova 2 sustava dalekovoda su prikazani na slici 3.4.



Slika 3.4. Konfiguracija dalekovoda, (lijevo) Horizontalni jednosistemski sustav dalekovoda, (desno) Dvosistemski sustav dalekovoda [5]

Iznos magnetske indukcije za horizontalni jednosistemski sustav dalekovoda iznosi:

$$B = \frac{\mu_0 I s}{2\pi R} \sqrt{\left[ \frac{3R^2 + s^2}{R^4 - 2R^2 s^2 \cos 2\varphi_R + s^4} \right]} \quad (3-1)$$

Iznos magnetske indukcije za dvosistemski sustav dalekovoda iznosi:

$$B = \frac{3\sqrt{2}\mu_0 I s^2 R}{2\pi} \sqrt{\left[ \frac{R^4 + s^4}{R^{12} - 2R^6 s^6 \cos 6\varphi_R + s^{12}} \right]} \quad (3-2)$$

gdje je:  $\mu_0$  – magnetska permeabilnost vakuuma ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{H}{m}$ )

$s$  – udaljenost između dva fazna vodiča dalekovoda

$\varphi_R$  – kut između vektora  $R$  i horizontalne linije kao na slici 3.4.

$I$  – fazna struja voda dalekovoda

$R$  – udaljenost između središnje točke  $O$  i točke promatranja

Za bilo koji metalni objekt kojeg se može smatrati cilindričnog oblika, magnetsko polje će proizvesti električno polje  $E$ , koje prema Faradayevom zakonu elektromagnetske indukcije, jakost električnog polja će iznositi:

$$E = -\frac{dB}{dt} \cdot \frac{r}{2} \quad (3-3)$$

gdje je:  $\frac{dB}{dt}$  - brzina promjene magnetskog polja

$r$  - kružni tok polumjera.

To električno polje će stvoriti gustoću električne struje u metalnoj masi koja je obuhvaćena petljom električnog polja:

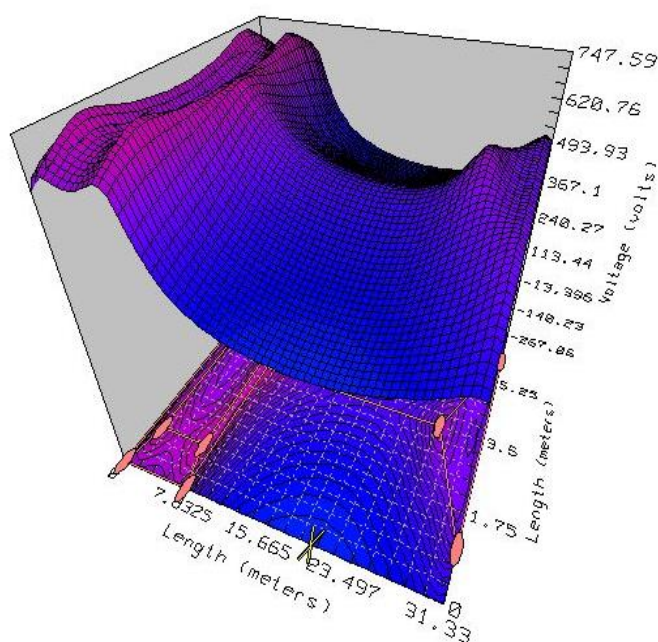
$$J = \sigma \cdot E = \sigma \cdot \frac{dB}{dt} \cdot \frac{r}{2} \quad (3-4)$$

gdje je:  $\sigma$  – električna provodnost

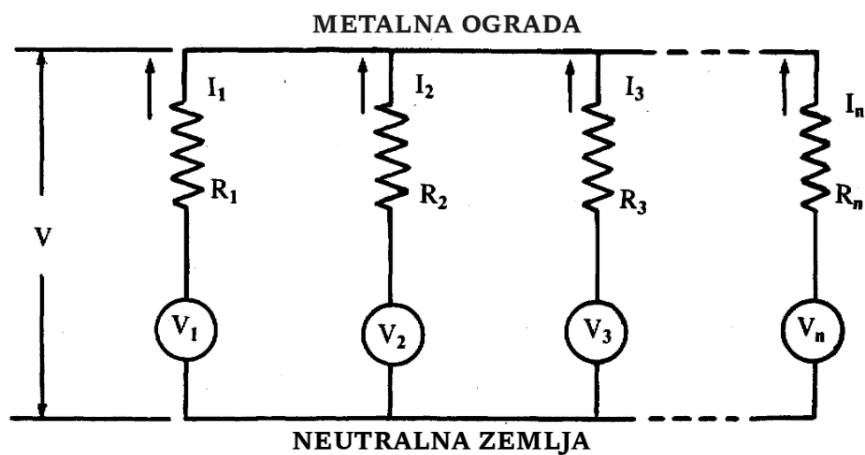
### 3.3. Otporni spoj

Porast potencijala na metalnim masama zbog otpornog sloja nastaje uslijed dozemnih kratkih spojeva koji imaju dodir sa zemljom kao što je jednofazni kratki spoj, dvofazni kratki spoj uz istovremeni spoj sa zemljom te zemljospoj. Zbog povratnog puta struje kvara kroz zemlju, raste potencijal zemlje i time raste potencijal metalne mase koja je u kontaktu sa zemljom.

Iznos dodirnog napona metalne ograde ovisi o iznosu porastu zemljinog potencijala, konfiguraciji izrade ograde i poziciji ograde u ovisnosti na krivulji raspodjele zemljinog potencijala. Primjer krivulje raspodjele zemljinog potencijala je prikazan na slici 3.3.



Slika 3.3. Primjer krivulje raspodjele potencijala zemljišta



Slika 3.4. Nadomjesna shema otpornog spoja između metalne ograde i neutralne zemlje [6]

Gdje je :  $V_K$  – potencijal k-tog stupa u odnosu na neutralnu zemlju

$I_K$  – struja kroz k-tog stupa

$R_K$  – otpor zemlje za k-ti stup

$$R_K = \frac{\rho_K}{2\pi L} \ln \left( \frac{4L}{O.D.} \right) \quad (3-5)$$

$\rho_K$  – otpornost zemlje za k-ti stup

$L$  – dubina ukopa stupa

O.D. – vanjski promjer betonskog temelja

$n$  – broj stupova

$k = 1, 2, 3, \dots, n$

$V$  – resultantni potencijal metalne ograde u odnosu na neutralnu zemlju

Prema nadomjesnoj shemi na slici 3.4. se mogu raspisati jednadžbe za izračun potencijala ograde:

$$V = V_1 - I_1 R_1 \quad (3-6)$$

$$V = V_2 - I_2 R_2 \quad (3-7)$$

$$V = V_3 - I_3 R_3 \quad (3-8)$$

.....

$$V = V_n - I_n R_n \quad (3-9)$$

$$0 = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (3-10)$$

Rješavanjem ovog seta jednadžbi iznos potencijala metalne ograde s obzirom na neutralnu zemlju se može izraziti:

$$V = \frac{\frac{V_1}{I_1} + \frac{V_2}{I_2} + \frac{V_3}{I_3} + \dots + \frac{V_n}{I_n}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots + \frac{1}{R_n}} \quad (3-11)$$

$$V = \frac{\sum_1^n \frac{V_k}{R_k}}{\sum_1^n \frac{1}{R_k}} \quad (3-11)$$

Ako se na dubini od 3 do 4 puta dubine ukopa metalnog stupa može pretpostaviti da je specifična otpornost zemlje jednolika, izraz se pojednostavljuje i zapisuje o obliku:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n \quad (3-12)$$

$$V = \frac{V_1 + V_2 + V_3 + \dots + V_n}{n} \quad (3-13)$$

$$V = \frac{\sum_1^n V_k}{n} \quad (3-14)$$

## **4. PRAVILNICI I NORME**

Iznosi određenih električnih veličina kojima čovjek može biti izložen moraju zadovoljiti propisane pravilnike i norme.

Pravilnik je podzakonski normativni akt tijela državne uprave kojim se razrađuju pojedine odredbe zakona radi njegove primjene i njegov sadržaj mora biti potpuno usklađen sa zakonskim odredbama. Norme su dokumenti koje daju pravila, upute ili značajke pojedinih djelatnosti ili njihovim rezultatima, koje moraju biti u skladu s načelima i pravilima koje je pripremio tehnički odbor.

Zbog mogućnosti prisustva čovjeka u blizini dalekovoda i u blizini metalnih masa koje mogu doći pod napon, potrebno je projektirati dionice dalekovoda i metalnih masa tako da zadovolje pravilnike koje propisuju dozvoljene iznose elektromagnetskih polja i dopuštene napone dodira metalnih masa.

### **4.1. Izloženost elektromagnetskim poljima**

Izlaganje elektromagnetskim valovima može dovesti do zdravstvenih problema kod čovjeka, a neki od primjera mogu biti [7] :

- Glavobolja
- Kardiovaskularni problemi (palpitacija srca, pritisak u prsima i slično)
- Dermatološki problemi (crvenilo, svrbež i slično)
- Umor
- Problemi sa spavanjem
- Problemi s koncentracijom

Zbog toga se mora ograničiti moguće izlaganje čovjeka prevelikim iznosima elektromagnetskih polja. Dozvoljeni iznosi električnog i magnetskog polja ovise o njihovim frekvencijama i lokaciji na kojima se nalaze izvori tih polja. Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja iz 2012. godine propisuje zaštitu ljudi od elektromagnetskih polja na javnom području, području povećane osjetljivosti te područje profesionalne izloženosti te ih definira na sljedeći način [8]:

- Javno područje je svako mjesto u urbanim i ruralnim sredinama na koja nije ograničen slobodan pristup općoj populaciji, a nisu u području povećane osjetljivosti odnosno profesionalne izloženosti.

- Područja povećane osjetljivosti jesu zgrade stambene i poslovne namjene, škole, ustanove predškolskog odgoja, rodilišta, bolnice, domovi za starije i nemoćne, smještajni turistički objekti te dječja igrališta.

- Područja profesionalne izloženosti jesu područja u kojima radnik, koji obavlja poslove vezane za izvore elektromagnetskih polja može biti izložen elektromagnetskim poljima 40 sati tjedno pri čemu je radnik upoznat s mogućnošću izlaganja, a njegova izloženost elektromagnetskim poljima je kontrolirana.

Tablica 4.1. Granične razine referentnih veličina za javna područja [9]

Frekvencijski opseg	Jakost električnog polja $E$ [V/m]	Jakost magnetskog polja $H$ [A/m]	Gustoća magnetskog toka $B$ [ $\mu$ T]	Gustoća snage ekvivalentnog ravnog vala [ $W/m^2$ ]
1 Hz-8 Hz	$10^4$	$3.2 \cdot 10^4 / f^2$	$4 \cdot 10^4 / f^2$	-
8 Hz-25 Hz	$10^4$	$4 \cdot 10^3 / f$	$5 \cdot 10^3 / f$	-
25 Hz-800 Hz	$2.5 \cdot \frac{10^5}{f}$	$4 \cdot 10^3 / f$	$5 \cdot 10^3 / f$	-
0.8 kHz-3 kHz	$\frac{250}{f}$	5	6.25	-
3 kHz-100 kHz	83	5	6.25	-
100 kHz-150 kHz	83	5	6.25	-
0.15 MHz-1 MHz	83	$0.73 / f$	$0.92 / f$	-
1 MHz-10 MHz	$\frac{83}{\sqrt{f}}$	$0.73 / f$	$0.92 / f$	-
10 MHz-400 MHz	26	$6.9 \cdot 10^{-2}$	$8.7 \cdot 10^{-2}$	1.8
400 MHz-2 GHz	$1.3 \cdot \sqrt{f}$	$3.45 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	$4.3 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$	$4.5 \cdot 10^{-3} \cdot f$
2 GHz-10 GHz	58	0.15	0.19	8.9
10 GHz-300 GHz	58	0.15	0.19	8.9

Tablica 4.2. Vrijednosti upozorenja za profesionalnu izloženost električnim poljima [9]

Raspon frekvencije	Niske vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja [ $V/m$ ]	Visoke vrijednosti upozorenja za jakost električnog polja [ $V/m$ ]
$1 \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2.0 \cdot 10^4$	$2.0 \cdot 10^4$
$25 \leq f < 50 \text{ Hz}$	$5 \cdot 10^5 / f$	$2.0 \cdot 10^4$
$50 \text{ Hz} \leq f < 1.64 \text{ kHz}$	$5 \cdot 10^5 / f$	$1.0 \cdot 10^6 / f$
$1.64 \text{ kHz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$5 \cdot 10^5 / f$	$6.1 \cdot 10^2$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1.7 \cdot 10^2$	$6.1 \cdot 10^2$

Tablica 4.3. Vrijednosti upozorenja profesionalne izloženosti magnetskim poljima [10]

Raspon frekvencije	Niske vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka B [ $\mu T$ ]	Visoke vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka B [ $\mu T$ ]	Vrijednosti upozorenja za gustoću magnetskog toka za izloženost ekstremiteta lokaliziranom magnetskom polju [ $\mu T$ ]
$1 \text{ Hz} \leq f < 8 \text{ Hz}$	$2.0 \cdot 10^5 / f^2$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$8 \text{ Hz} \leq f < 25 \text{ Hz}$	$2.5 \cdot 10^4 / f$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$25 \text{ Hz} \leq f < 300 \text{ Hz}$	$1.0 \cdot 10^3$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$300 \text{ Hz} \leq f < 3 \text{ kHz}$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$3.0 \cdot 10^5 / f$	$9.0 \cdot 10^5 / f$
$3 \text{ kHz} \leq f \leq 10 \text{ MHz}$	$1.0 \cdot 10^2$	$1.0 \cdot 10^2$	$3.0 \cdot 10^2$

Za izračun graničnih vrijednosti uzimamo frekvenciju od 50 Hz, što je frekvencija elektroenergetskog sustava i tako je parametriran model mreže u simulaciji. Za 50 Hz u javnim područjima, iznos granične razine jakosti električnog polja iznosi 5000 V/m, a za gustoću magnetskog toka je 100  $\mu T$ .



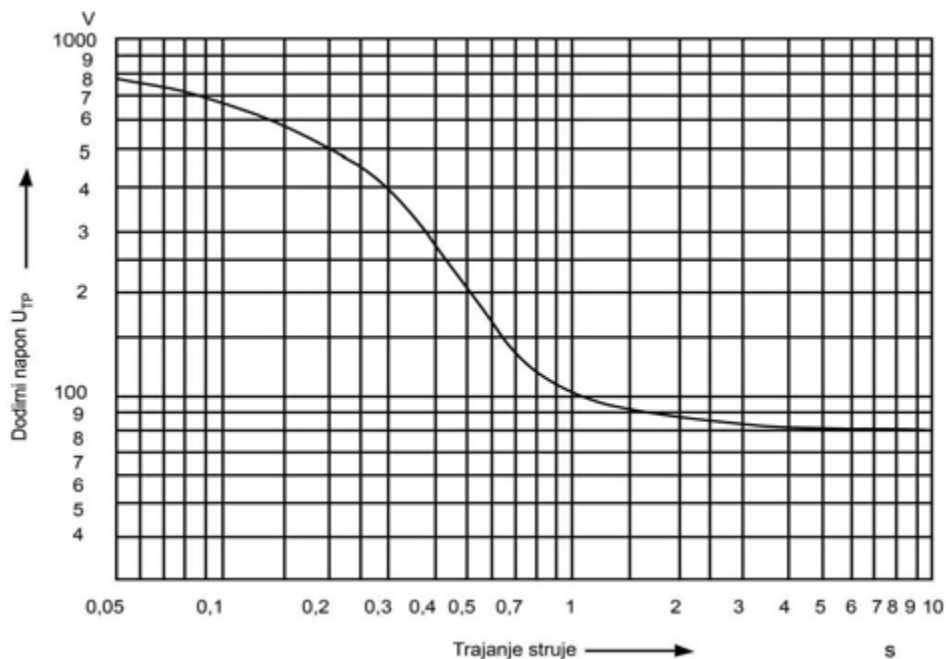
Za profesionalnu izloženost postoje više razina izloženosti; niska vrijednost upozorenja, srednja vrijednost upozorenja te za magnetsko polje postoji još i vrijednost upozorenja za izloženost ekstremitetima. Pri 50 Hz, niske vrijednosti upozorenja za profesionalnu izloženost za električno polje iznosi 10000 V/m, a za magnetsko polje je 1000  $\mu$ T.

## 4.2. Dopušteni napon dodira i koraka

Prolazak struje kroz ljudsko tijelo može prouzrokovati razne probleme, ovisno o iznosu struje. Kao primjer su grčenje mišića, opekline kože, oštećenje živaca i mišića te smetnje pri radu srca. Kako si se ograničila mogućnost da čovjek dođe u električnu opasnost, iznosi napona dijelova koje su pod naponom moraju se ograničiti.

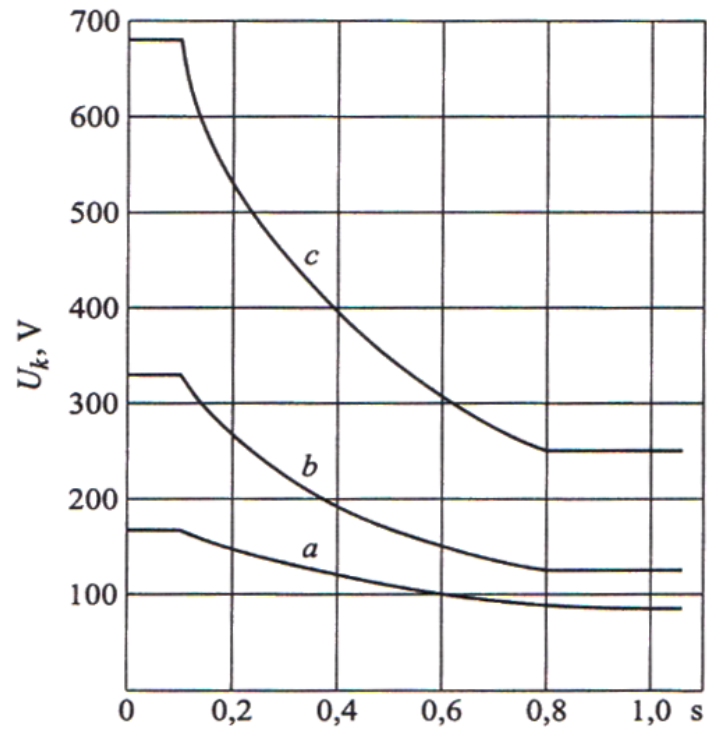
Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom, članak 66. [11] propisuje da je trajno dopušteni dodirni napon 50 V unutar električnog postrojenja. Ako se radi o nadzemnim vodovima s metalnom konstrukcijom stupova, iznos trajno dopuštenog dodirnog napona iznosi 25 V.

Ako je metalna masa došla pod napon uslijed kratkog spoja, dopušta se i viši napon dodira, ovisno o vremenu trajanja struje, kao što je vidljivo na slici 4.1.



Slika 4.1. Dijagram dopuštenog dodirnog napona u odnosu na vrijeme trajanja struje [11]

Iako niti jedna norma ne propisuje dozvoljene napone koraka za javna područja, potrebno je razmotriti dozvoljene vrijednosti napona koraka unutar električnog postrojenja gdje postoji uzemljivački sustav i gdje se može stvoriti potencijalni lijevak.



Slika 4.2. Dopušteni napon koraka [12]

Slika 4.2. predstavlja dopušteni napon koraka u ovisnosti o trajanju kvara [12]. Na dijagramu su tri krivulje koje ovise o položaju s obzirom na sustav.

Krivulja 'a' predstavlja položaj izvan postrojenja na prometnim površinama.

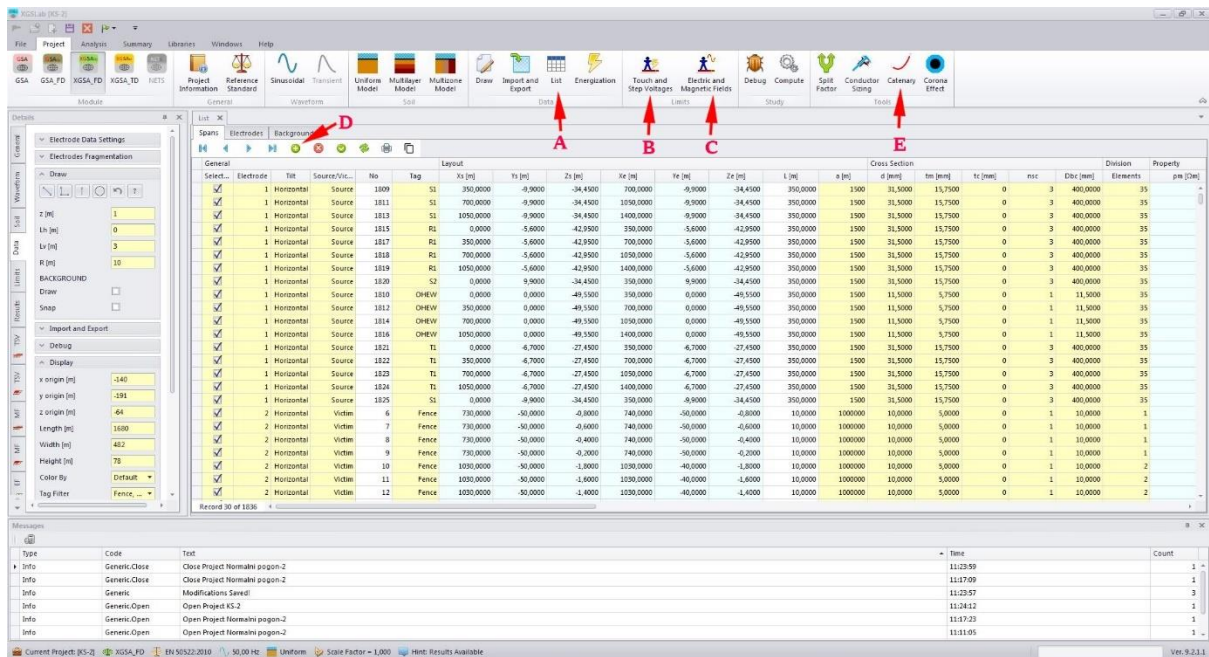
Krivulja 'b' predstavlja položaj unutar postrojenja i izvan postrojenja isključujući 'a'.

Krivulja 'c' predstavlja položaj unutar postrojenja na otvorenom uz uporabu izolacijskih cipela [12].

Prema krivulji 'a' koja je za prometne površine, ali je najbliža situaciji javnih površina, iznos trajno dopuštenog napona koraka je 80 V.

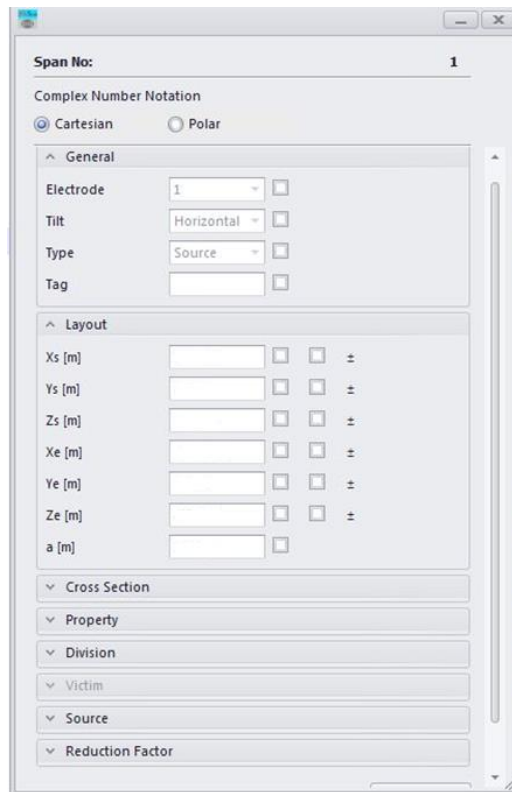
## 5. SIMULACIJA

Simuliranje utjecaja dalekovoda na metalnu ogradu se odradilo sa XGSLab softverskim alatom, točnije s XGSA\_FD modulom koji vrši analizu u frekvencijskoj domeni.



Slika 5.1. Izgled sučelja XGSLab softvera

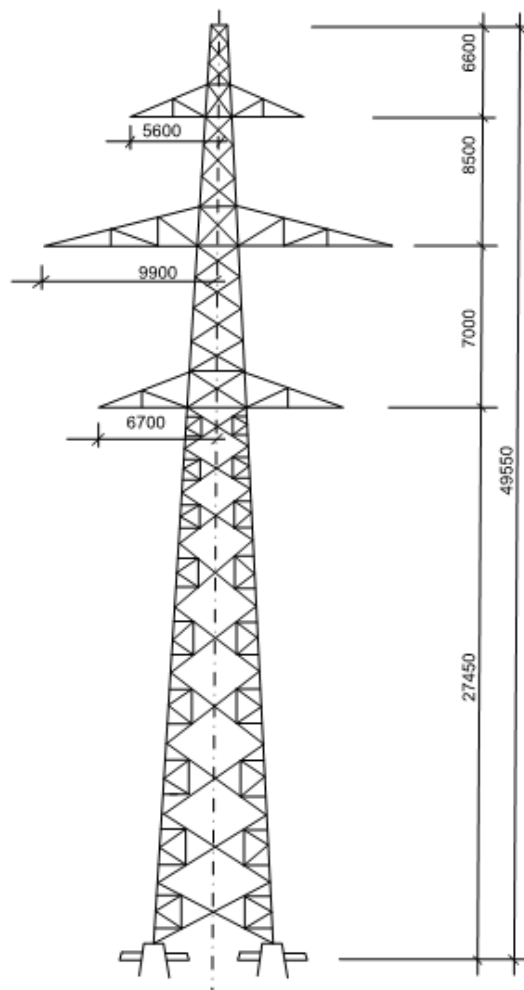
Prethodna slika prikazuje softversko sučelje XGSLab softvera, gdje strelica 'A' pokazuje tipku 'List', koja otvara popis svih elemenata u modelu mreže. Strelice 'B' i 'C' prikazuju tipke koje pokazuju gdje se unose podaci o dozvoljenim granicama o naponima dodira i koraka te o električnom i magnetskom polju. Strelica 'D' prikazuje tipku za unos novog elementa mreže. Unos podataka o novom elementu mreže pri se obavlja pomoću početnih i krajnjih koordinata, gdje se time specificira početak, kraj i duljina određenog elementa u mreži. Primjer unosa jednog elementa je prikaza na slici 5.2. Izračun podataka o provjesu vodiča dalekovoda se obavlja pomoću tipke 'E'.



Slika 5.2. Unos novog elementa u XGSLab

## 5.1. Model mreže

Nadomjesni model mreže je opisan s duljinom dalekovoda od 1400 m i razmakom od 350 m između nosača dalekovoda. Metalna ograda je postavljena ispod dalekovoda tako da su joj dvije strane paralelne s koridorom dalekovoda, a dvije strane okomite na njega.



Slika 5.3. Izgled stupa dalekovoda

Parametri dalekovoda:

- Razmak među nosačima: 350 m
- Promjer snopa vodiča: 400 mm, sastavljen od 3 podvodnika promjera 31,5 mm
- Promjer zaštitnog užeta: 11,5 mm

Parametri metalne ograde

- Dimenzija: 300 x 200 m
- Visina ograde: 1,8 m
- Razmak između stupova ograde: 10 m
- Promjer metalne žice: 10 mm
- Broj paralelnih žica ograde: 9

Prilikom crtanja faznih vodiča dalekovoda uzimalo se u obzir i provjes samog vodiča. Zbog svoje mase i toplinskog rastezanja središnji dio vodiča između dva nosača dalekovoda je na nižoj visini od tla s obzirom na visinu na kojoj je pri nosačima.

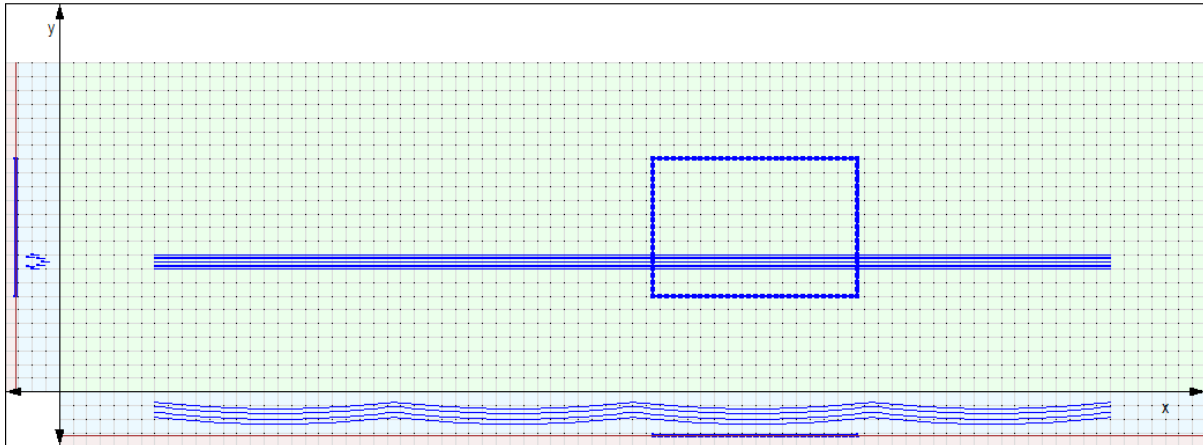
Prilikom crtanja unutar softvera XGSlab je potrebno podesiti parametre provjesa vodiča, a za izračun tih parametara koristi se ugrađeni alat unutar XGSlab softvera koji se otvara prilikom tipke 'E' na slici 5.1.

Slika 5.4 prikazuje izračun parametara provjesa za vodič faze T, gdje se postavio provjes od 10,22 m.

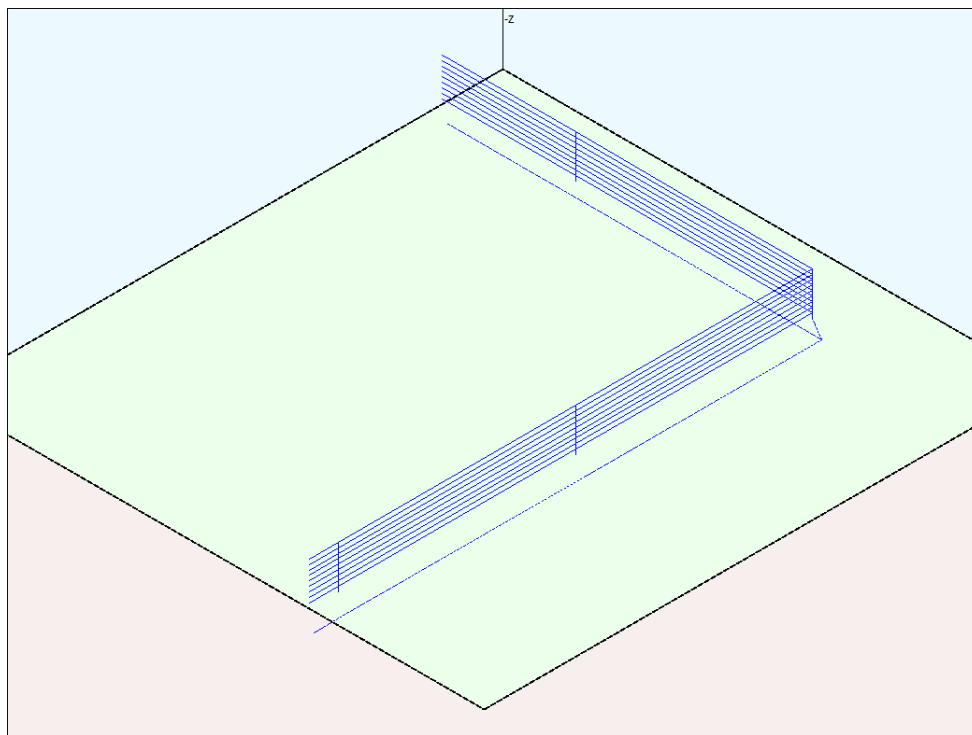


Slika 5.4. Izračun provjesa vodiča dalekovoda

Gdje je:  $a$  – provjesna konstanta  
 $b, k$  – provjesne konstante povezane za horizontalne i vertikalne razlike u krajnjim točkama vodiča



Slika 5.5. Model promatranog sustava



Slika 5.6. 3D prikaz metalne ograde sa uzemljivačem

Unutar simulacija se razmatralo je li ograda uzemljena ili nije. Uzemljivač se postavljao sa vanjske strane ograde na udaljenost od 20 cm.

Parametri uzemljivača

- Materijal: Fe/Zn traka 25x4 mm
- Ekvivalentni promjer: 18,47 mm
- Dubina ukopa: 0,8 m

## 5.2. Slučaj normalnog pogona

Linijski napon dalekovoda iznosi 400 kV, što je za  $\sqrt{3}$  veće od faznog napona. Također, fazni naponi su međusobno zarotirani za  $120^\circ$ . Iznos fazne struje je 1500 A. Kroz zaštitno uže teče struja od 100 A, koja je struja izjednačenja potencijala između stupova dalekovoda. Naponi i struje koje su se koristile pri simulaciji u normalnim uvjetima su prikazani u tablici 5.1.

$$U_R = \frac{400000}{\sqrt{3}} \angle 0^\circ = 230940 \angle 0^\circ V \quad (5-1)$$

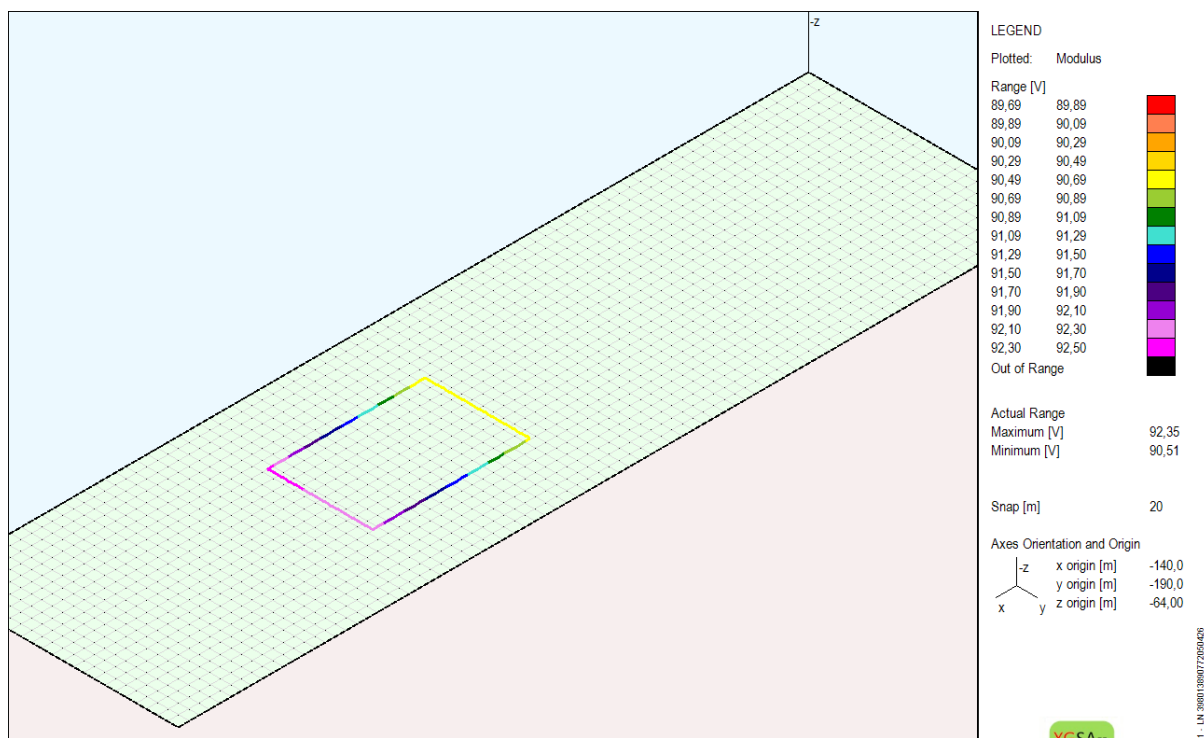
$$U_S = 230940 \angle 120^\circ V \quad (5-2)$$

$$U_T = 230940 \angle 240^\circ V \quad (5-3)$$

Tablica 5.1. Iznos faznih napona i struja dalekovoda

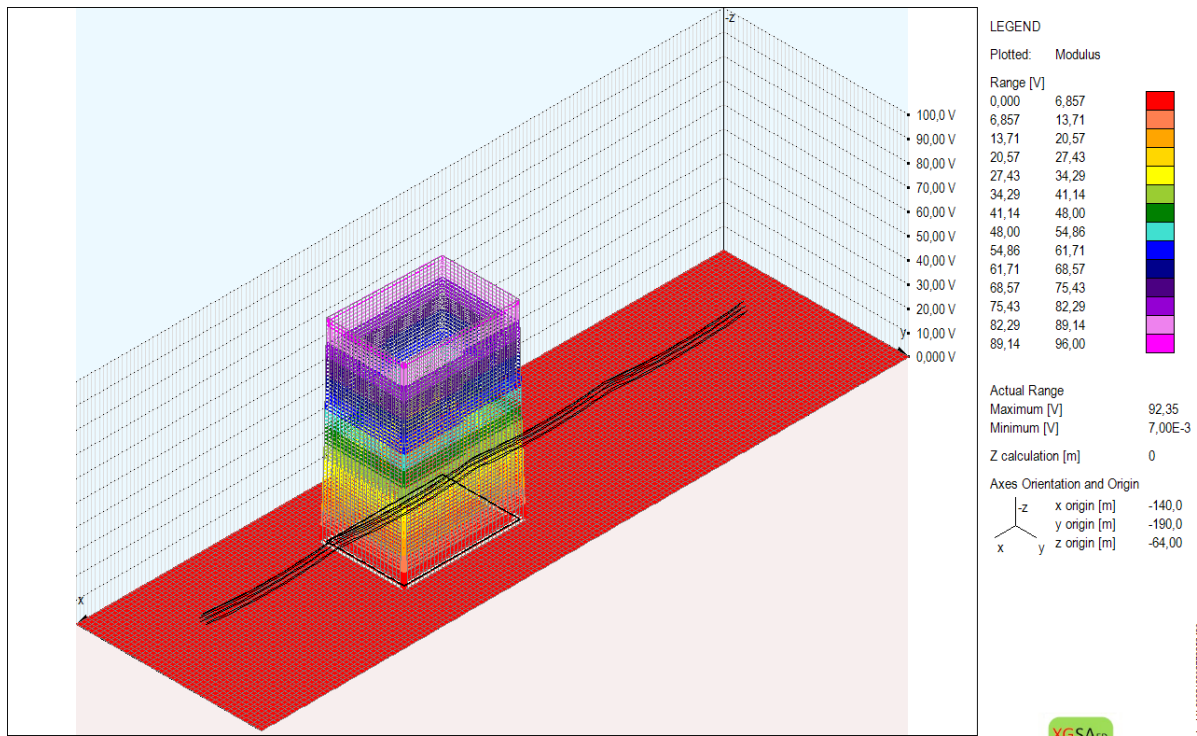
Faza	Fazni pomak [ $^\circ$ ]	Fazni napon [V]	Fazna struja [A]
R	0	230940	1500
S	120	-115470+j200000	-750+j1299
T	240	-115470-j200000	-750-j1299
Zaštitno uže	0	0	100

### 5.2.1. Neuzemljena ograda pri normalnom pogonu

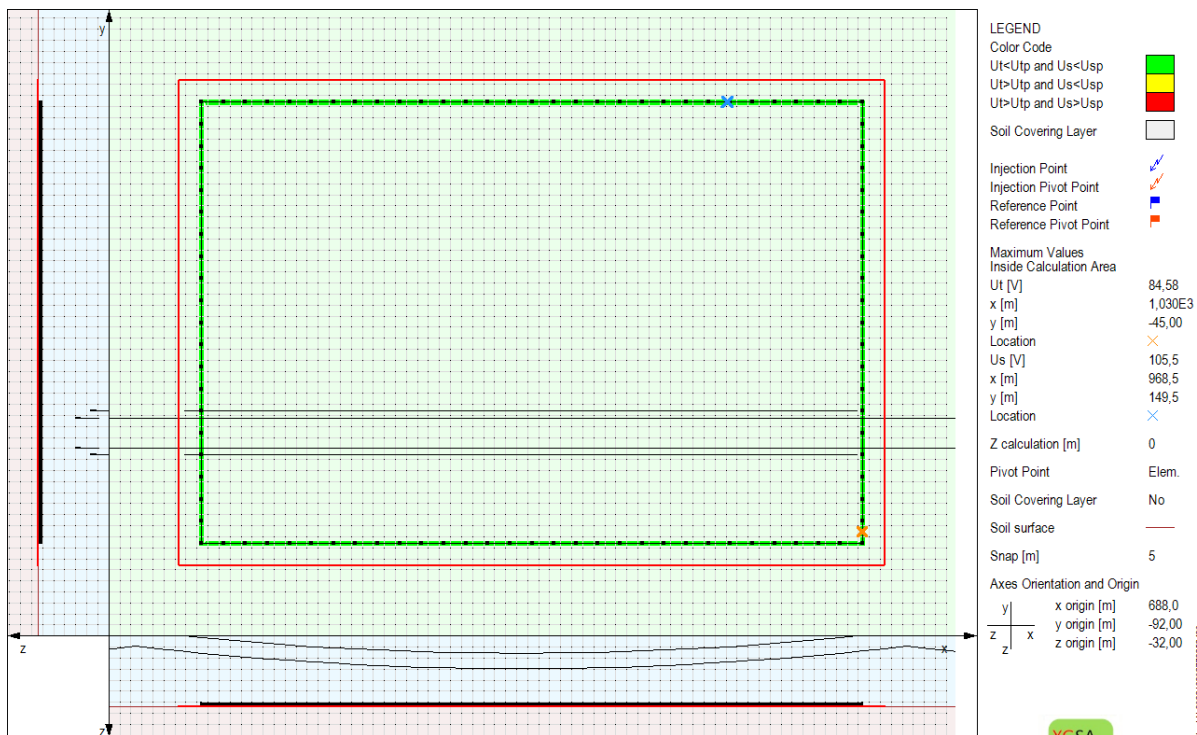


Slika 5.7. Potencijal neuzemljene ograde





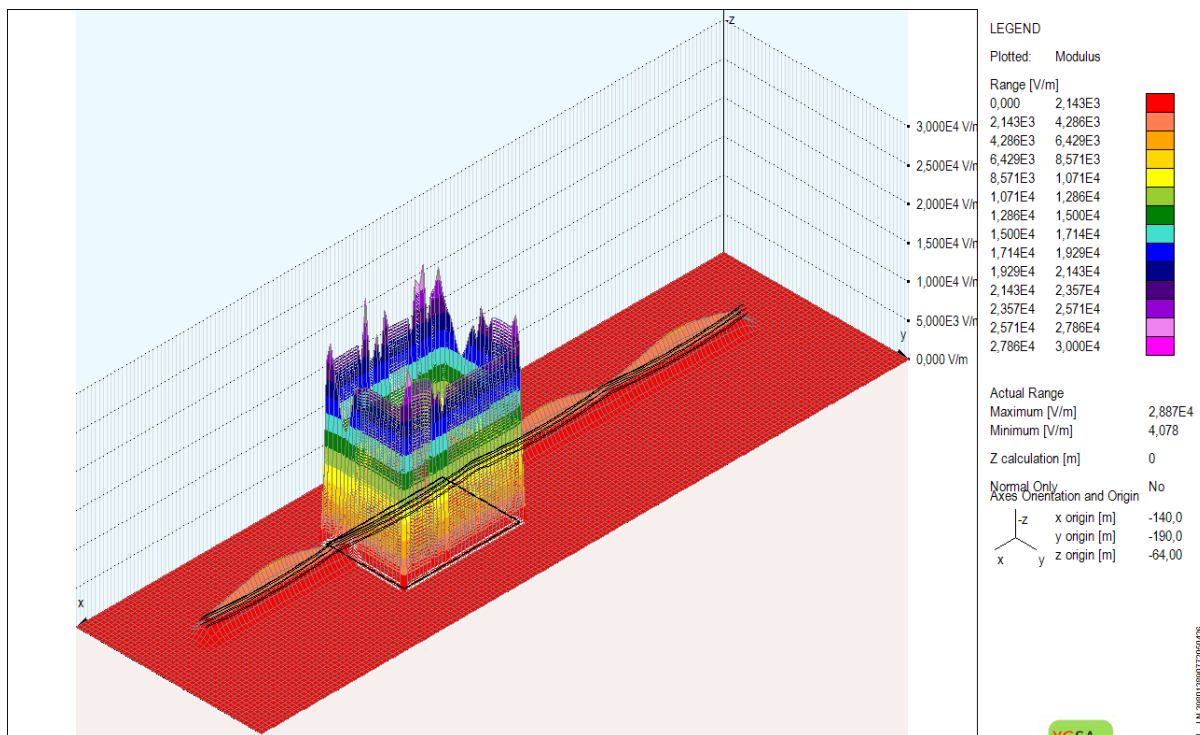
Slika 5.8. Potencijal zemljišta oko ograde



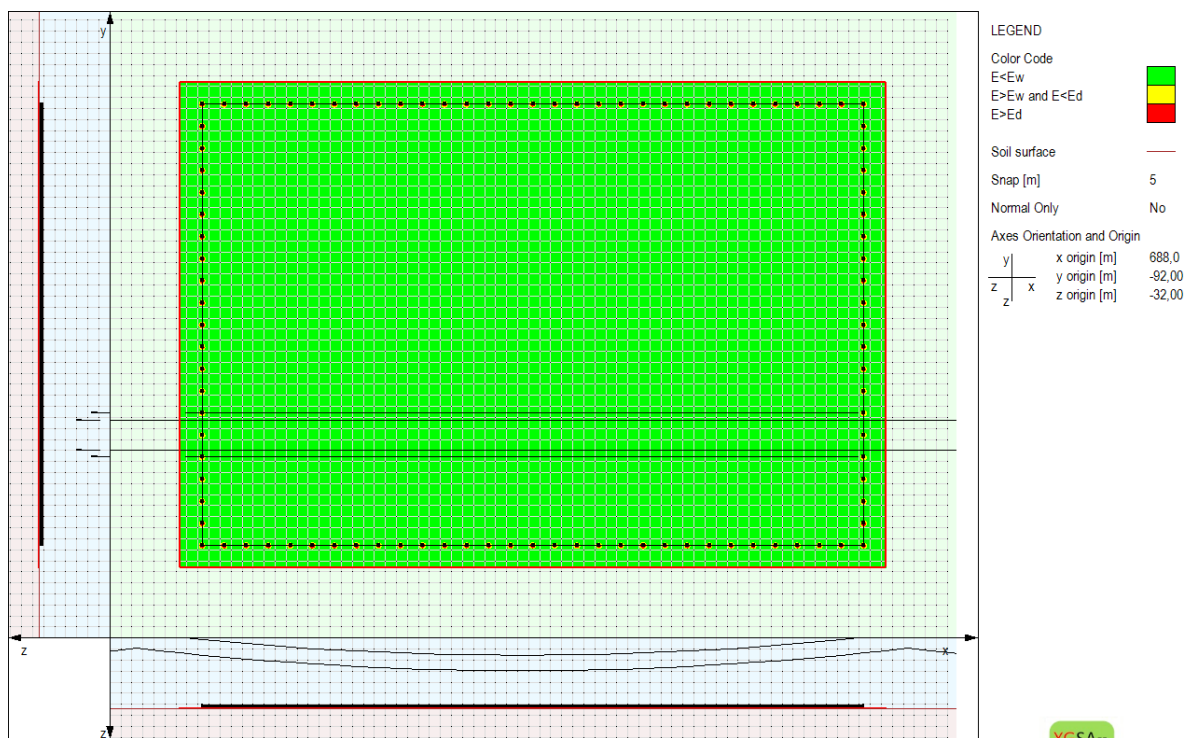
Slika 5.9. Naponi dodira i koraka

Prilikom normalnog pogona neuzemljena ograda inducira maksimalni potencijal od 92,35 V. Slika 5.8. prikazuje izrazito strmi rast potencijala zemljišta tik uz ogradu. To je rezultat što ograda nije uzemljena pomoću uzemljivača već zemljište preuzima potencijal metalnih stupova koji su u dodiru sa zemljom. Također je vidljivo da potencijal zemljišta u odnosu na neutralnu zemlju dostiže maksimalnih 92,35 V, što je maksimalni potencijal metalne ograde.

Sigurnosna analiza napona dodira i napona koraka sa slike 5.9. prikazuje da su maksimalni napon dodira metalne ograde 84,58 V, što premašuje propisanih 50 V te da je maksimalni napon koraka iznosi 105,5 V, što je veći iznos od dopuštenih 80 V i oni predstavljaju opasnost za ljudsko zdravlje.



Slika 5.10. Električno polje oko ograde na razini zemlje

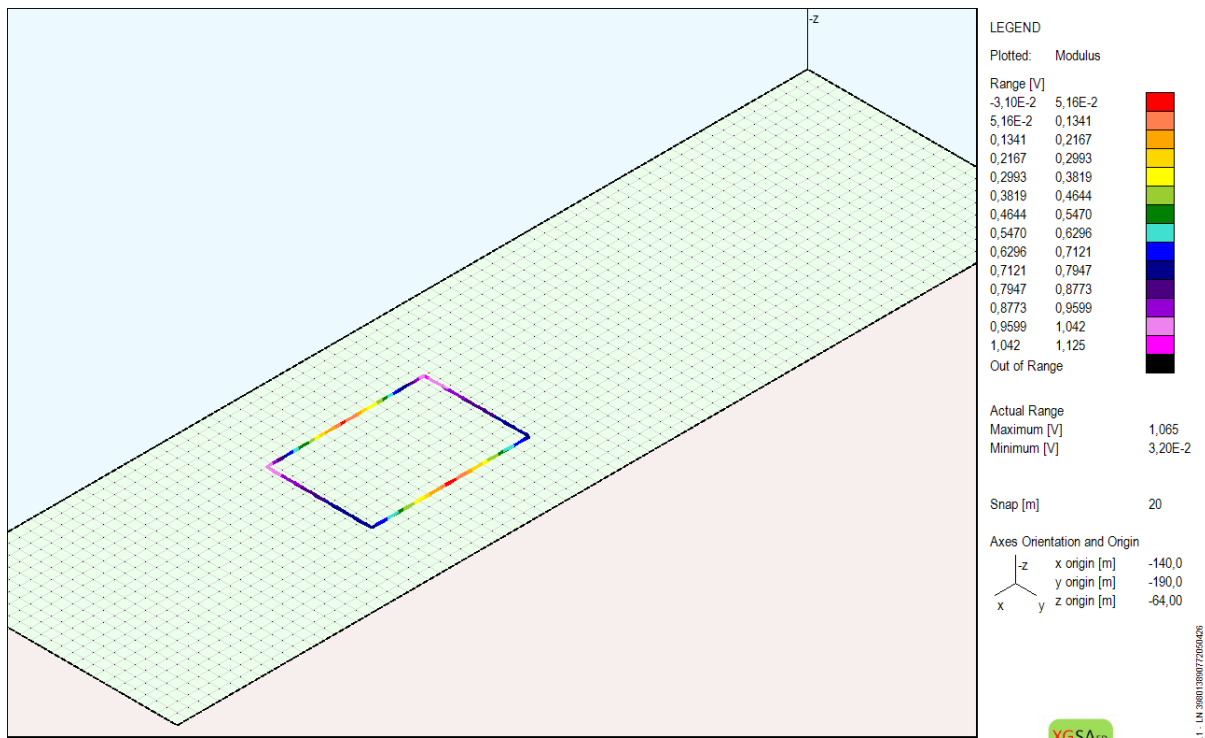


Slika 5.11. Sigurnosna zona električnog polja u blizini ograde

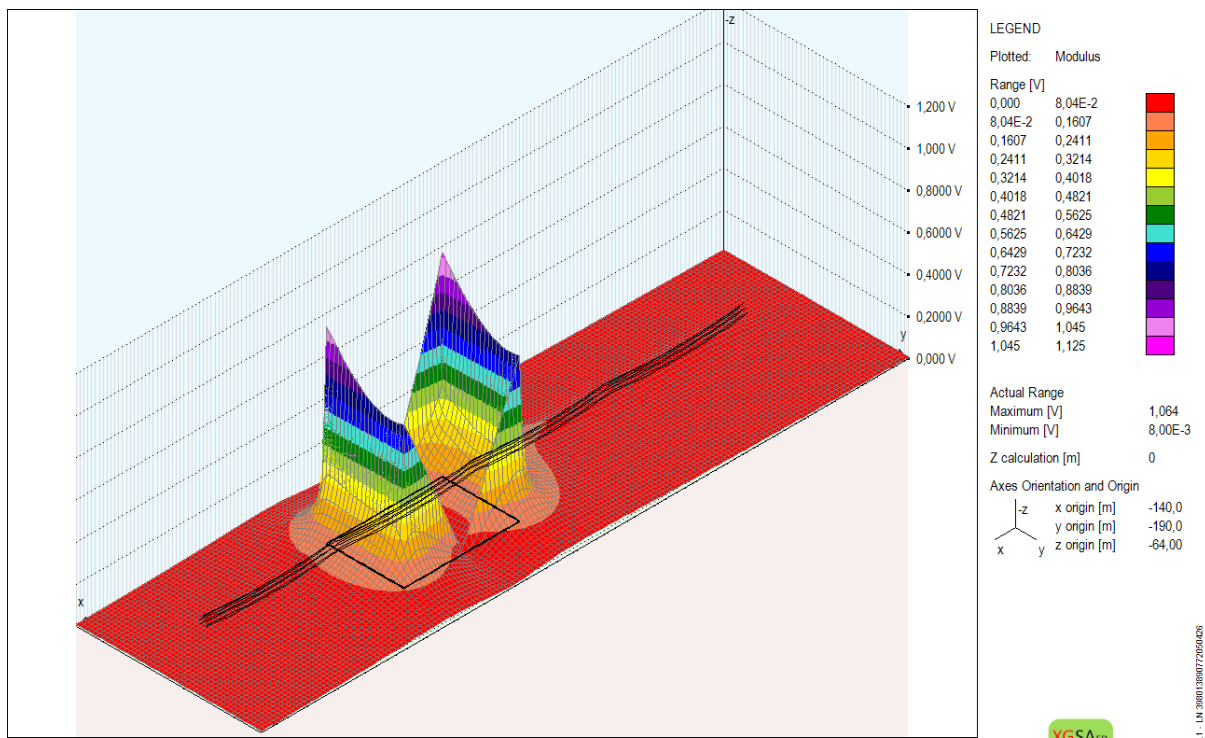
Jakost električnog polja na površini zemlje je izrazito nejednolika te slika 5.10. prikazuje kako se jakost električnog polja koncentrira uz samu ogradu. Između nosača dalekovoda se vidi povećanje električnog polja na površini zemlje, a razlog tomu je provjes vodiča dalekovoda. Ti iznosi ne prelaze propisane iznose za javna područja.

Maksimalna vrijednost električnog polja iznosi 28870 V/m i time prelazi dopušteni iznos za javna područja. Iako je električno polje na razini zemlje iznad dopuštenih vrijednosti, treba uzeti u obzir da se to događa ispod metalne ograde, mjesto na koje čovjek ne može pristupiti.

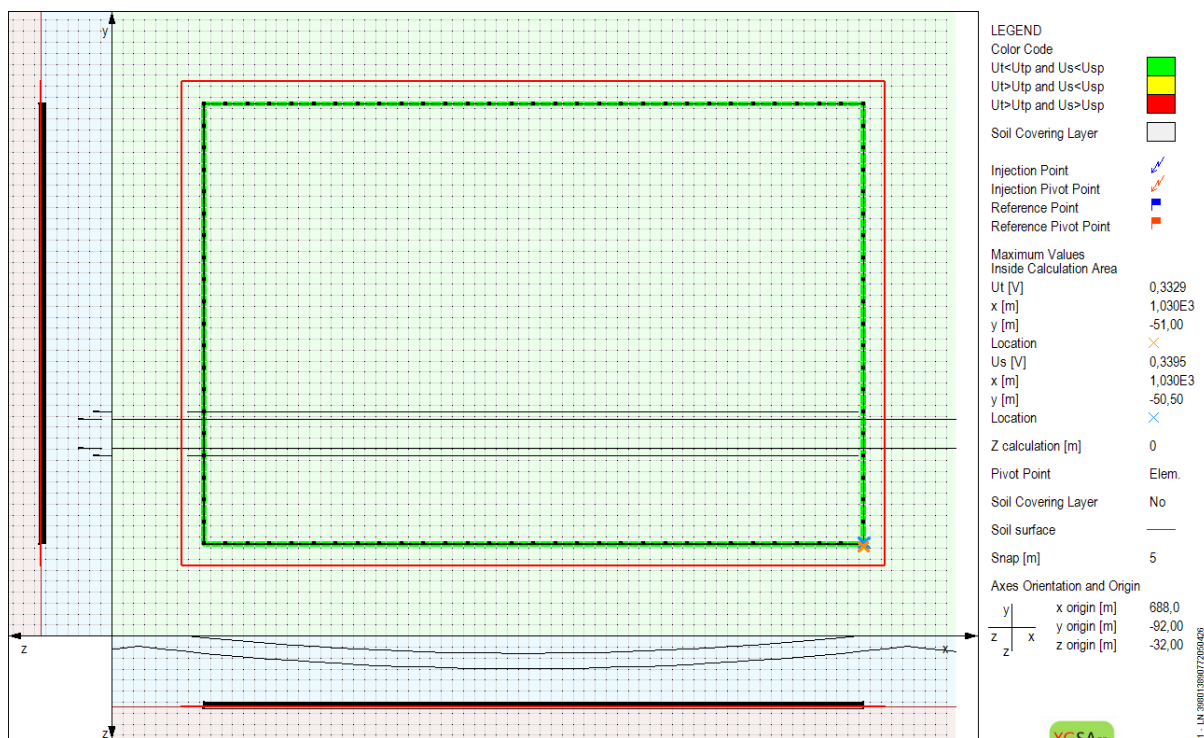
### 5.2.2. Uzemljena ograda pri normalnom pogonu



Slika 5.12. Potencijal uzemljene ograde



Slika 5.13. Potencijal zemljišta oko ograde

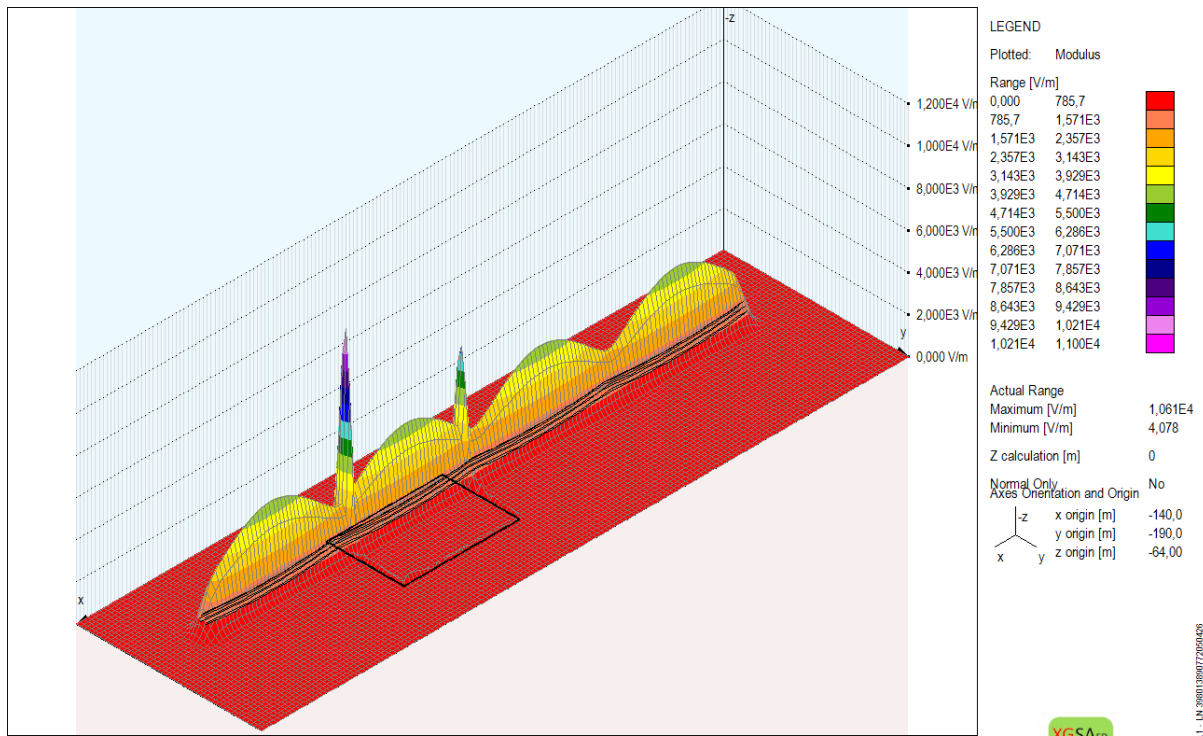


Slika 5.14. Naponi dodira i koraka

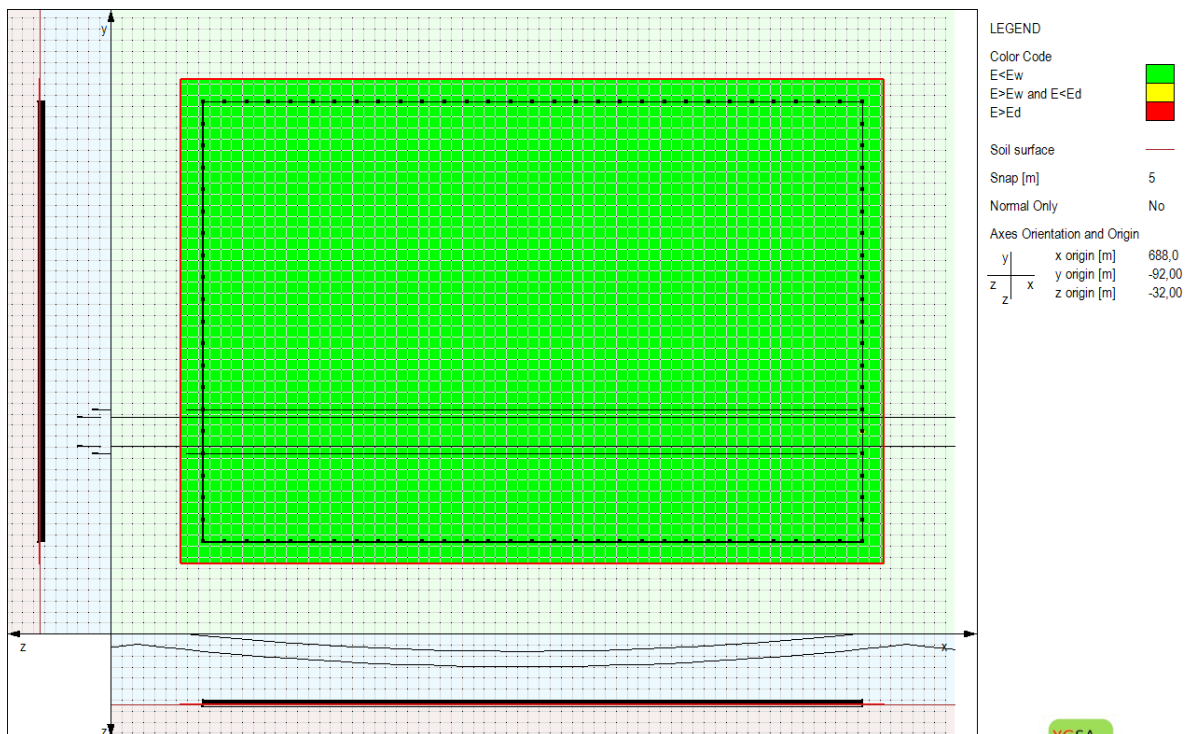
Prijašnje tri slike prikazuju veliko poboljšanje električnih karakteristika kod metalne ograde. Maksimalni potencijal ograde i maksimalni potencijal zemljišta s obzirom na neutralnu zemlju iznose tek 1,06 V, što je znak da uzemljivački sustav ispravno dimenzioniran za ovu ogradu.

Opasnosti od mogućih napona dodira i od napona koraka više ne postoje, jer maksimalne vrijednosti napona dodira i napona koraka iznose tek 0,33 V.

Naredne dvije slike se odnose na električno polje na površini zemlje kada je uzemljena metalna oграда. Električno polje na površini zemlje se smanjilo u odnosu kada je metalna oграда neuzemljena. Na slici 5.14. je vidljivo da je maksimalni iznos električnog polja 10610 V/m, što prelazi dozvoljene iznose za javna područja i za profesionalnu izloženost. Taj maksimum se javlja samo kod jednog metalnog stupa ograde koji je zračnom linijom najbliži vodičima dalekovoda.



Slika 5.15. Električno polje zemlje oko ograde



Slika 5.16. Sigurnosna zona električnog polja

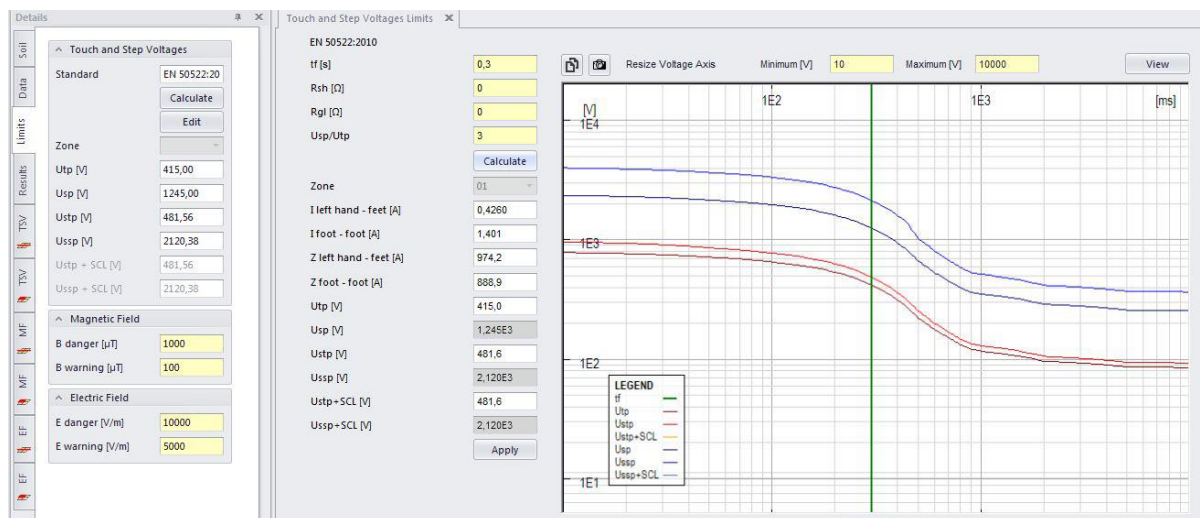
### 5.3. Slučaj kratkog spoja

Slučaj kratkog spoja se razmatrao kao jednofazni kratki spoj u fazi T što je najniži vod od zemlje. Iznos struje kratkog spoja je 15 kA i trajanje kratkog spoja, odnosno vrijeme prorade zaštite je 0,3 s. Naponi i struje koje se koriste pri simulaciji u slučaju kratkog spoja su prikazani u tablici 5.2.

Tablica 5.2. Iznos faznih napona i struja dalekovoda

Faza	Fazni pomak [°]	Fazni napon [V]	Fazna struja [A]
R	0	230940	0
S	120	-115470+j200000	0
T	240	-115470-j200000	15000
Zaštitno uže	0	0	100

Prema normi EN50522:2010, iznos napona dodira ovisi o trajanju kratkog spoja, odnosno vremenu prorade zaštite. Softver XGSLab ima mogućnost proračuna dozvoljenih iznosa napona dodira i prikazan je na slici 5.16.



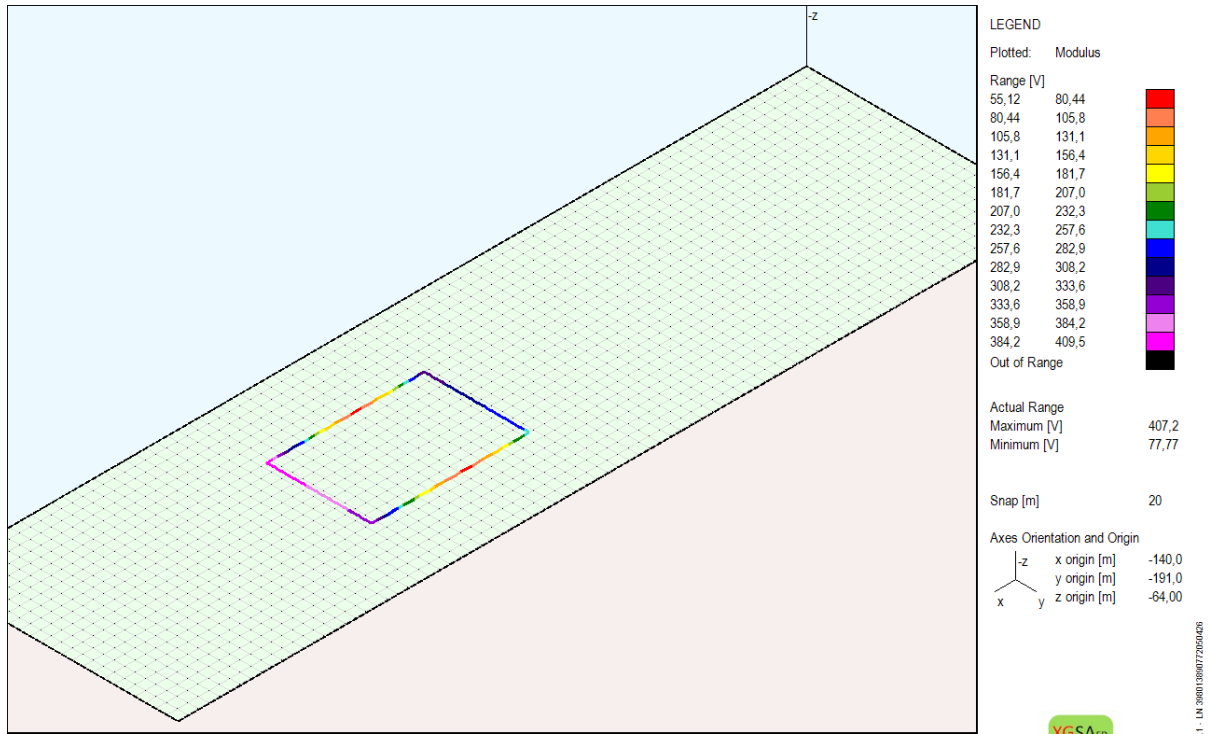
Slika 5.17. Proračun dozvoljenih iznosa napona dodira

U tom slučaju dozvoljeni napon dodira iznosi 415 V, dok prema normi EN 50522:2010 izračun iznosa dozvoljenog napona koraka nije točno definiran.

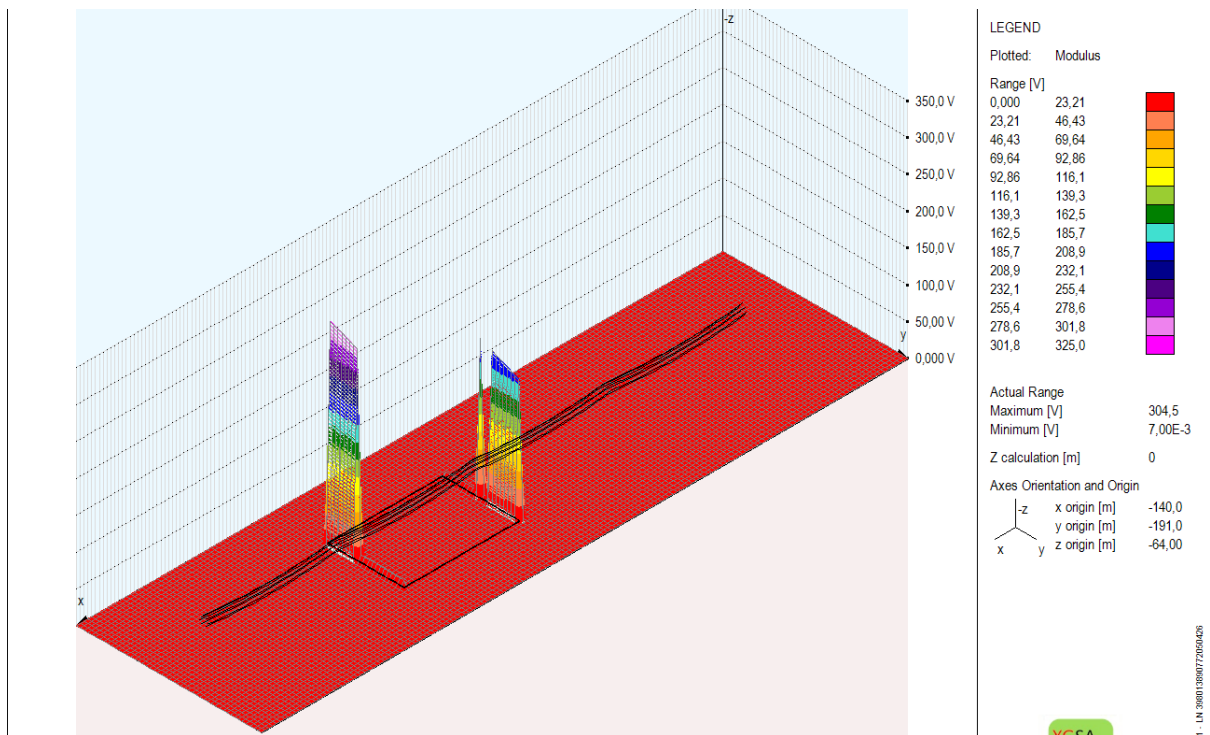
Za izračun iznosa dozvoljenog napona koraka na javnim područjima koristimo krivulju sa slike 4.2. koja postavlja najmanji dozvoljeni iznos napona koraka. Iako krivulja „a“ nije za javna

područja, već za prometna područja, nju koristimo jer je najbliža ovoj situaciji. Krivulja „a“ za trajanje kvara od 0,3 sekunde propisuje dozvoljeni napon koraka od 130 V.

### 5.3.1. Neuzemljena ograda pri kratkom spoju

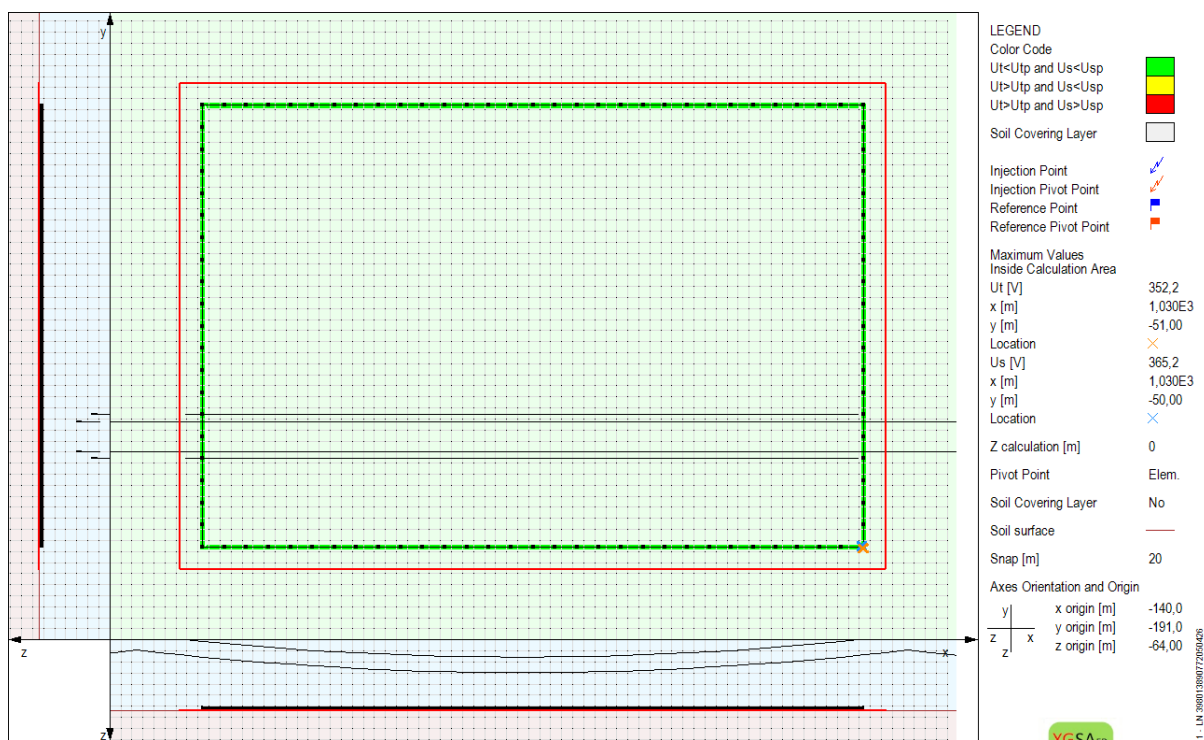


Slika 5.18. Potencijal neuzemljene ograde



Slika 5.19. Potencijal zemljišta oko ograde

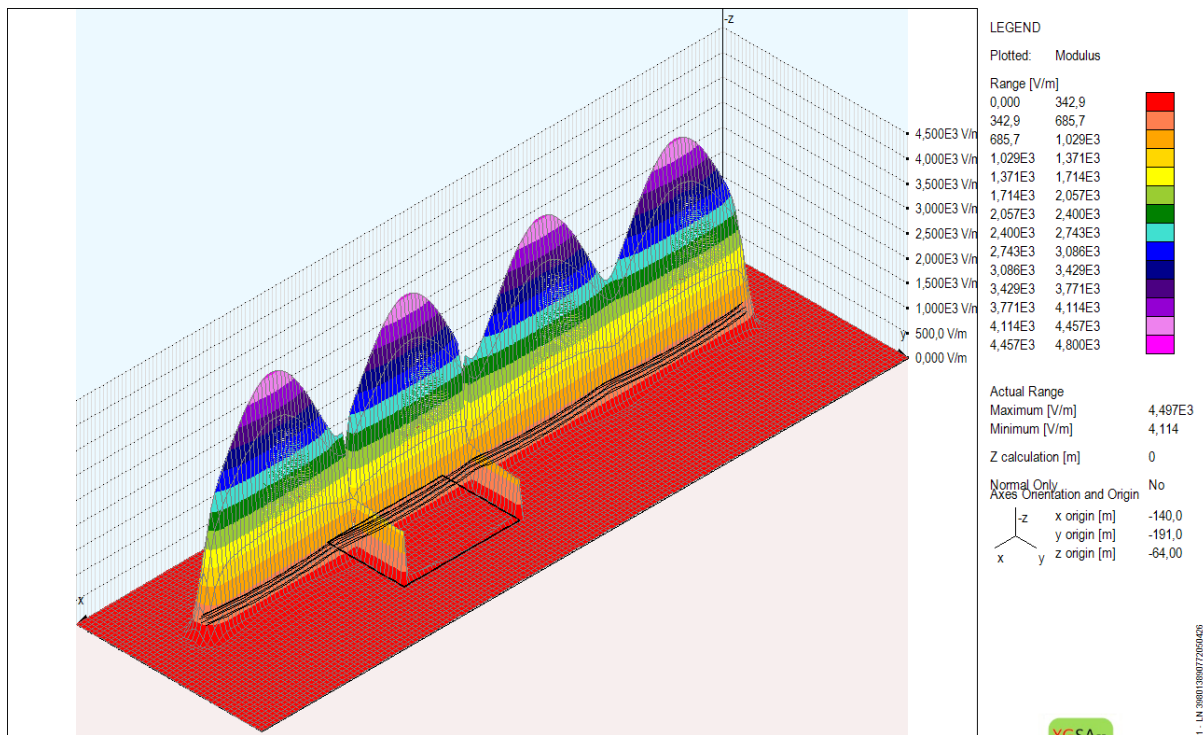




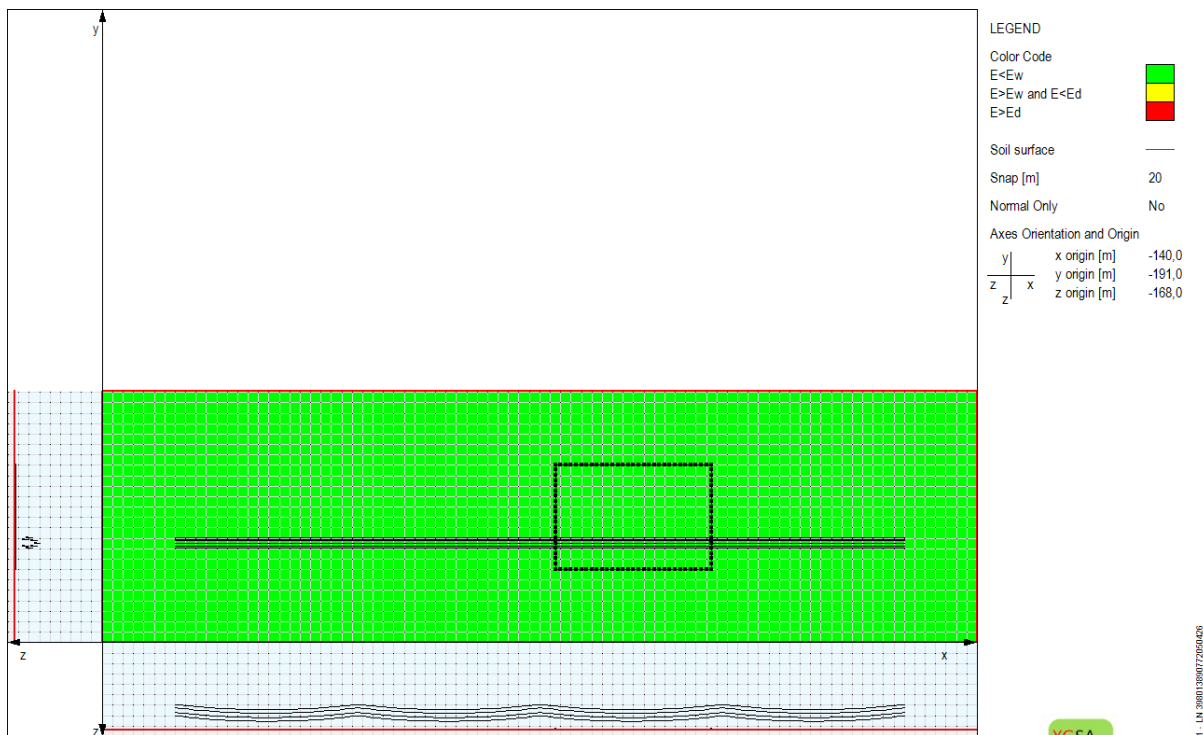
Slika 5.20. Napon dodira i koraka

Prijašnje tri slike prikazuju kako prilikom kratkog spoja neuzemljena ograda na sebi inducira maksimalni potencijal od 407,2 V. Vidljivo je da metalna ograda inducira veći potencijal na dijelovima ograde koje su pod okomitim kutom prema vodičima dalekovoda, a manji potencijal na dijelovima koji su paralelni. Potencijal zemljišta u blizini ograde je izrazito nejednolik i stvara se strmi potencijalni lijevak ispod okomitim dijelovima ograde s obzirom na dalekovod. Razlog ovakvog potencijalnog lijevka je što ne postoji nikakav sustav uzemljenja i sav potencijal zemljišta je uzrok kontakta metalnih stupova ograde sa zemljom.

Sigurnosna analiza napona dodira i napona koraka sa slike 5.20. prikazuje da je maksimalni napon dodira ograde iznosi 352,2 V, što ne prelazi propisanih 415 V normi EN50522:2010 s obzirom na vrijeme trajanja kratkog spoja. Maksimalni napon koraka je 365,2 V što prelazi dozvoljenih 130 V i time predstavlja opasnost za ljudsko zdravlje.

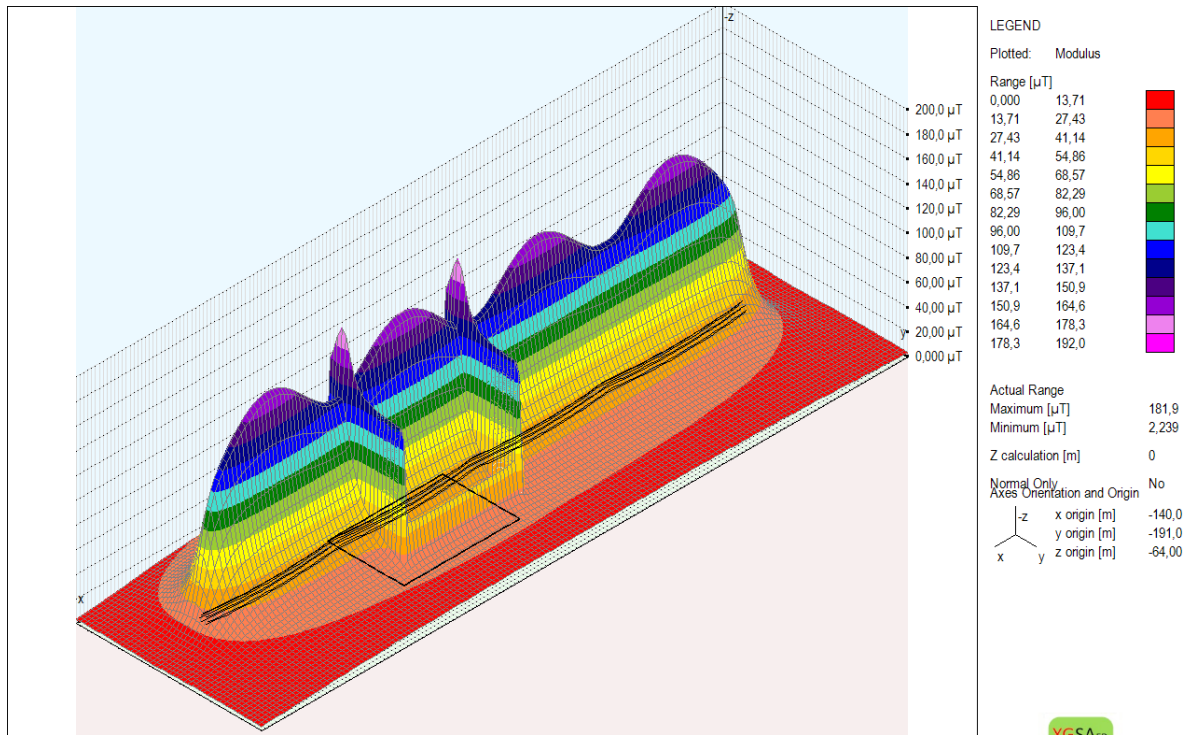


Slika 5.21. Električno polje oko ograde na razini zemlje

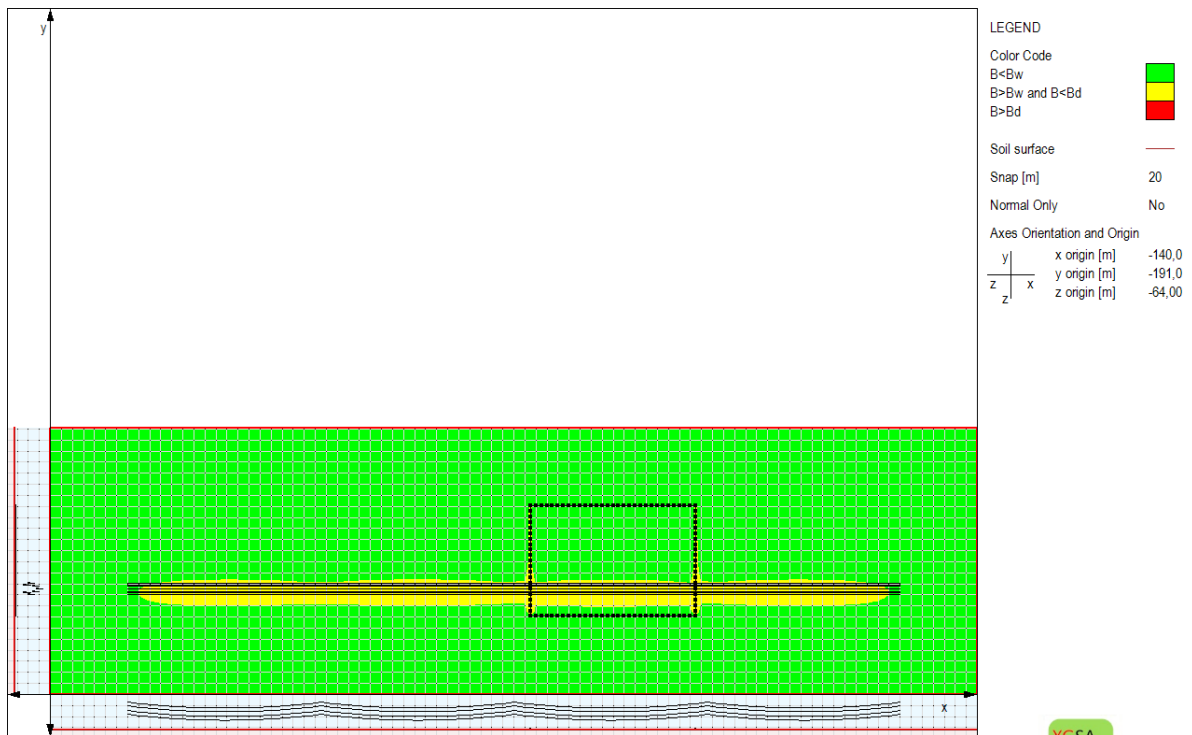


Slika 5.22. Sigurnosna zona električnog polja

Pri kratkom spoju električno polje na površini zemlje oko neuzemljene ograde ne stvara iznose koje prelaze propisane iznose i time ne ugrožavaju ljudsku sigurnost. Iznos električnog polja ne prelazi ni dozvoljene iznose za javna područja, ni za područja profesionalne izloženosti.



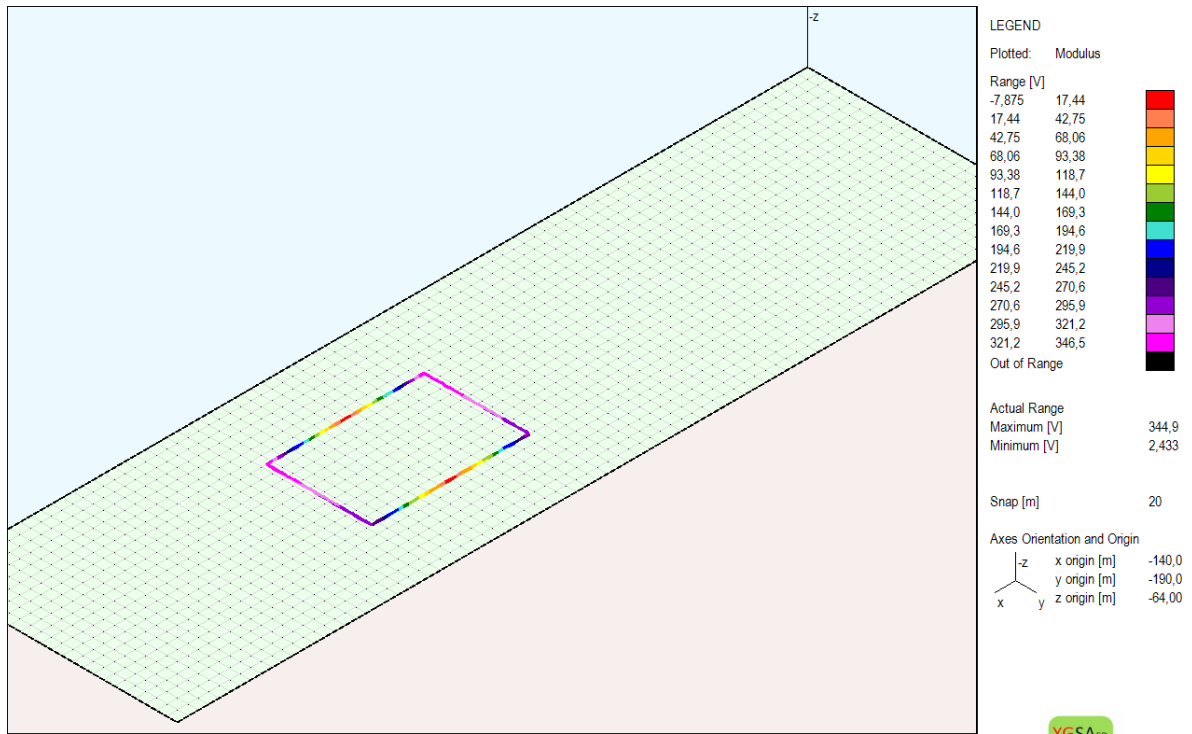
Slika 5.23. Magnetsko polje oko ograde na razini zemlje



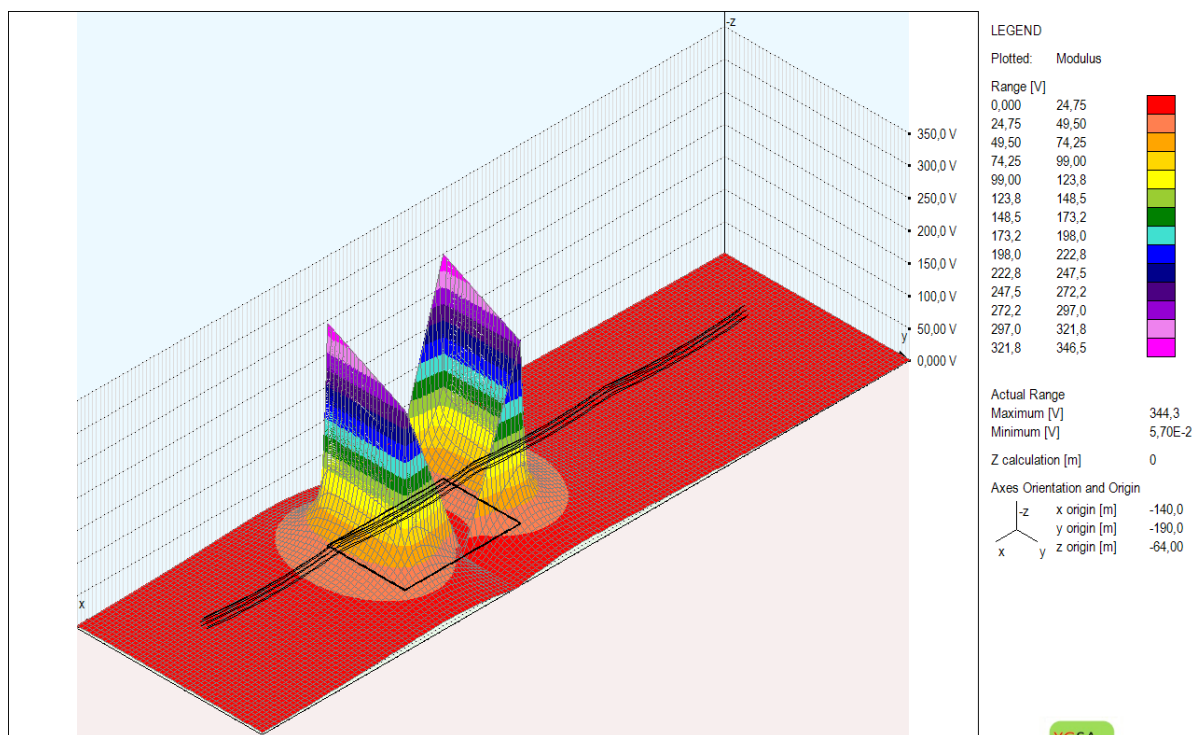
Slika 5.24. Sigurnosna zona magnetskog polja

Magnetsko polje na razini zemlje koje se stvara prilikom kratkog spoja duž svojim koridorom prelaze ograničenja za javne površine. Ispod okomitih dijelova na dalekovod nastaju maksimalni iznosi magnetskog polja na površini zemlje i njihov iznos je 181,9  $\mu\text{T}$ . Razlog tomu je što je tu metalna ograda najbliža vodiču dalekovoda kroz kojeg teče struja kvara.

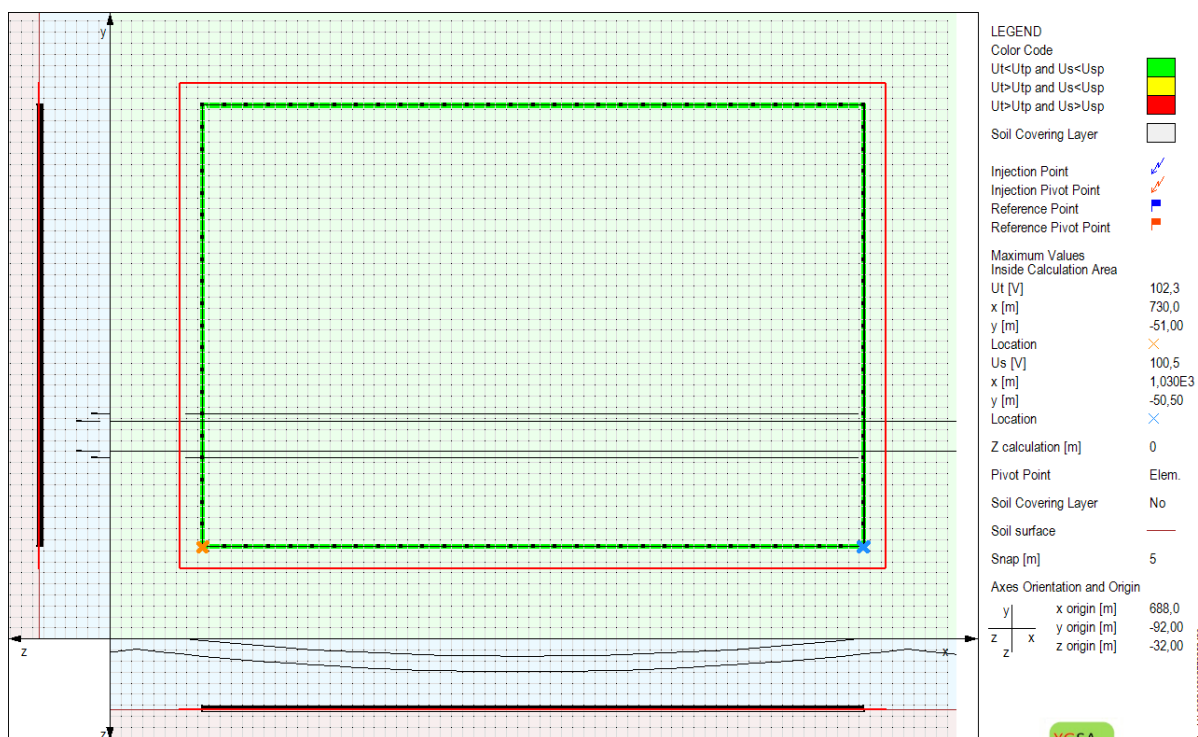
### 5.3.2. Uzemljena ograda pri kratkom spoju



Slika 5.25. Potencijal uzemljene ograde



Slika 5.26. Potencijal zemljišta oko ograde

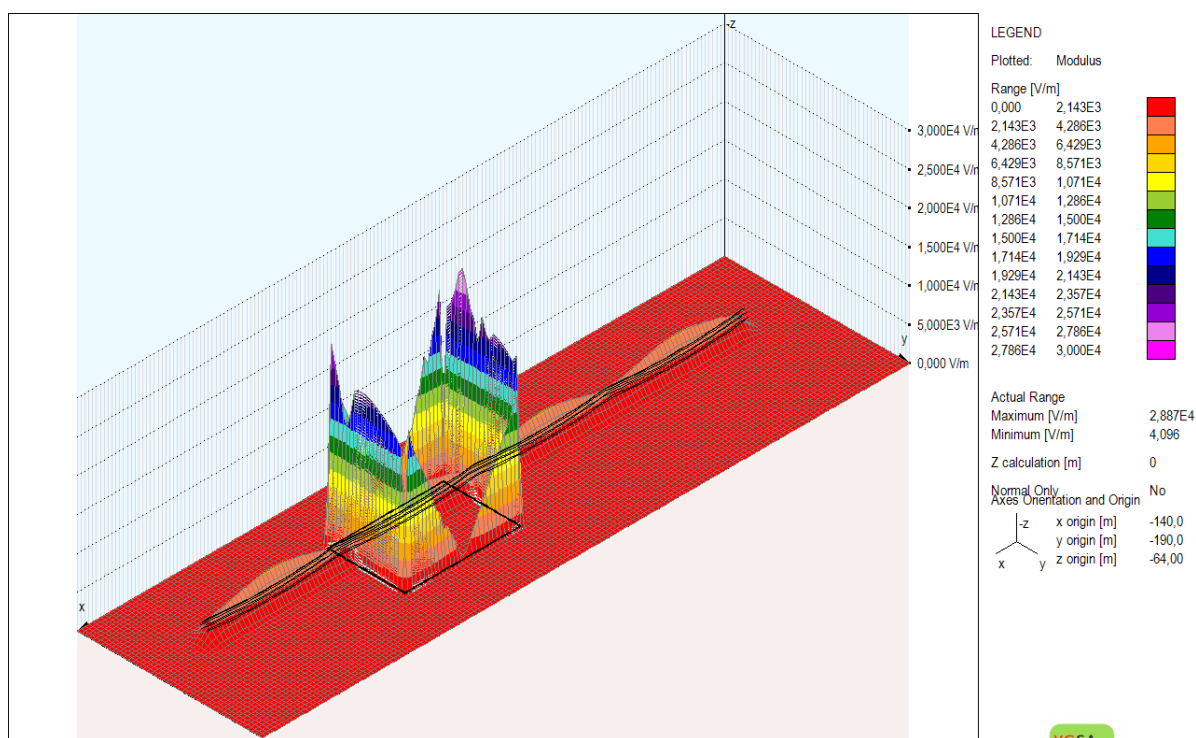


Slika 5.27. Napon dodira i koraka

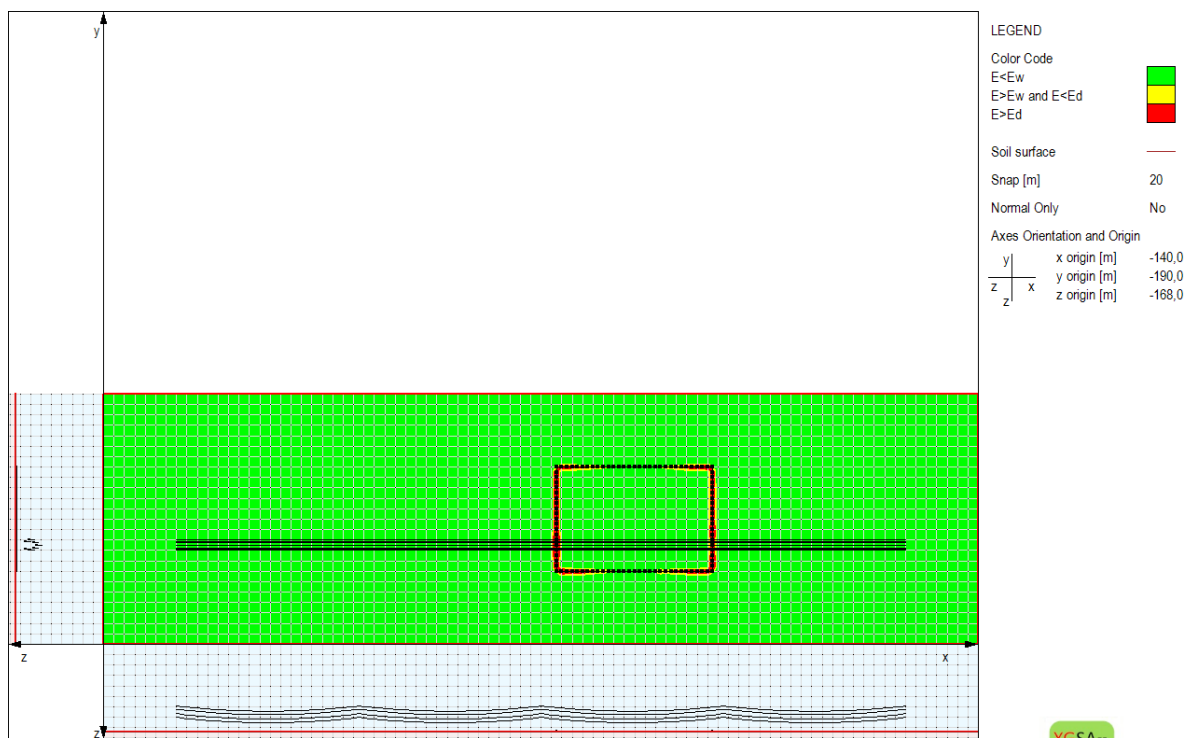
Prijašnje tri slike pokazuju kako djeluje uzemljivački sustav na metalnu ogradu prilikom kratkog spoja. Potencijal metalne ograde se smanjio s obzirom na slučaj neuzemljene ograde i maksimalni potencijal ograde s obzirom na neutralnu zemlju iznosi 344,9 V. Uzemljivački

sustav utječe na potencijalni lijevak zemljišta te ga oblikuje tako da ne postoji nagli skokovi kao što je slučaj kod neuzemljene ograde.

Sigurnosna analiza napona dodira i napona koraka sa slike 5.27. prikazuje veliko poboljšanje kod napona dodira i napona koraka. Maksimalni iznos napona dodira iznosi 107,3 V i time prema normi EN50522:2010 i trajanju kratkog spoja od 0,3 sekunde ne prelazi propisanih 415 V. Maksimalni napon koraka iznosi 105,3 V koje ne prelazi 130 V i time ne stvaraju ikakvu životnu opasnost za čovjeka.

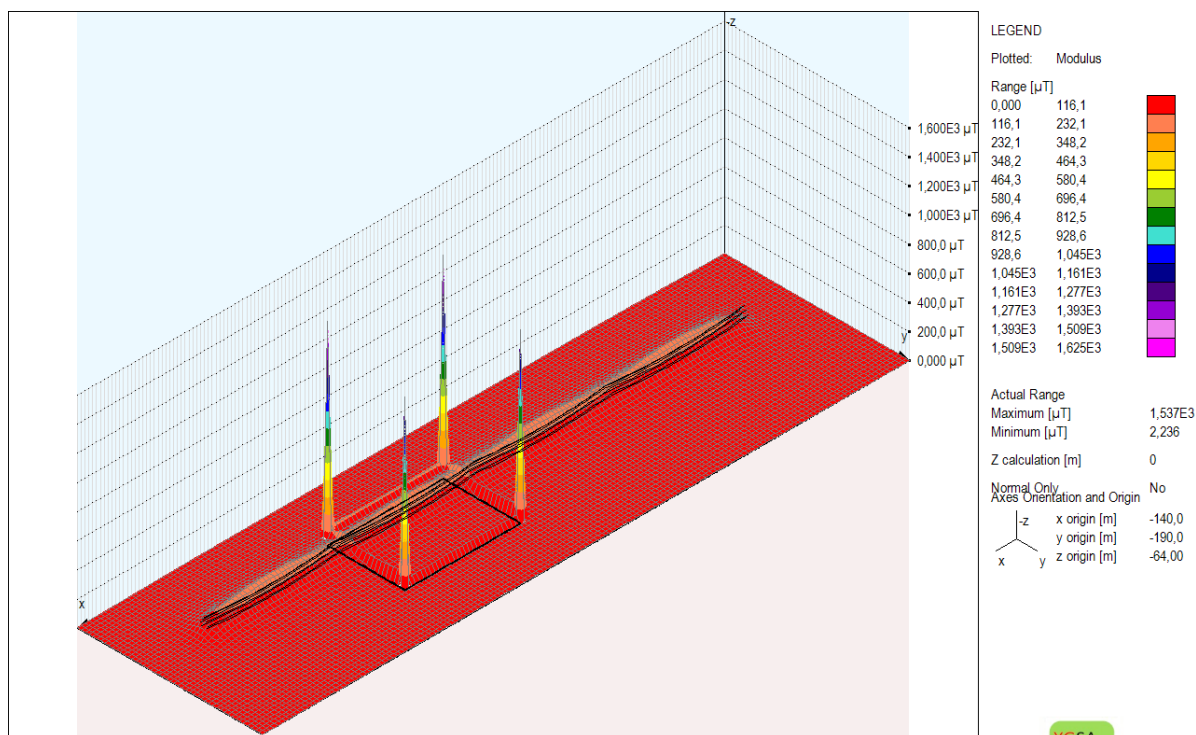


Slika 5.28. Električno polje oko ograde na razini zemlje

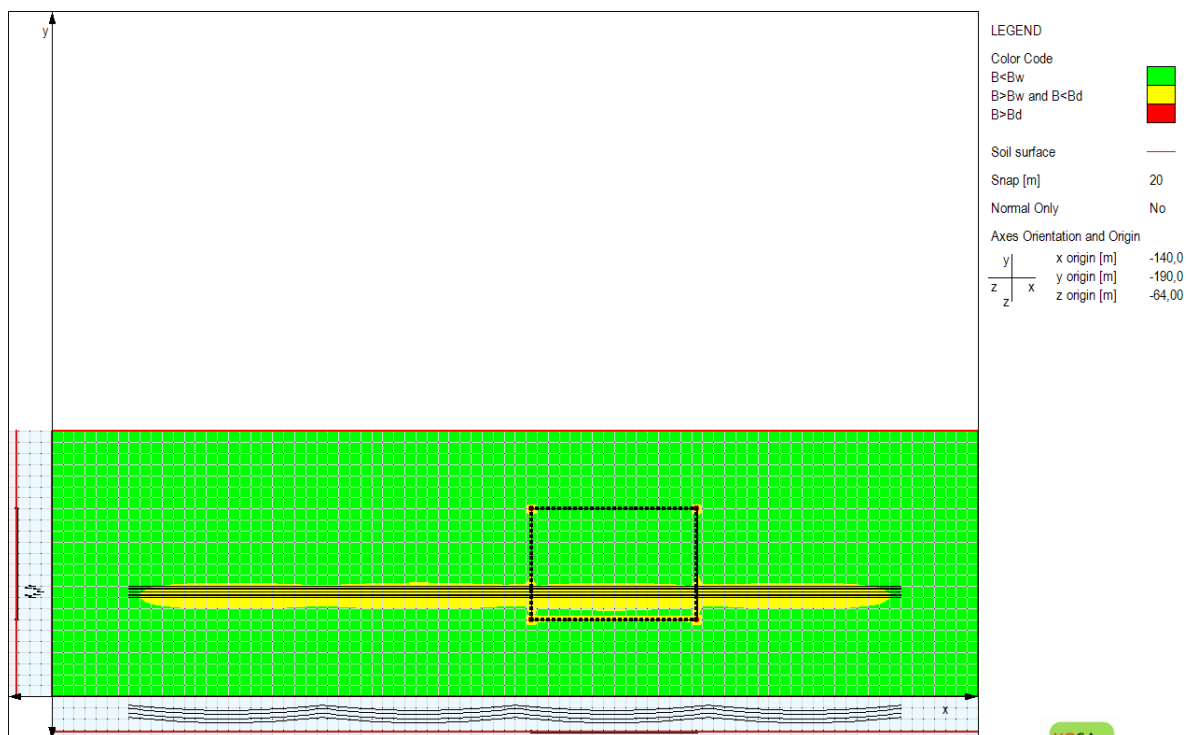


Slika 5.29. Sigurnosna zona električnog polja

Uzemljenje metalne ograde stvara razliku kod električnog polja na razini zemlje. Vidljivo je povećanje električnog polja u okruženju metalne ograde. Stvara se povećanje iznosa električnog polja u okolini metalne ograde. Razlog tomu je uzemljivački sustav koji dodatno inducira električno polje vodiča dalekovoda kojim teče struja kvara. Sigurnosna analiza električnog polja ukazuje da se stvaraju maksimumi iznosa električnog polja ispod dijela ograde koja je najbliža vodičima dalekovoda. Iznos maksimuma električnog polja iznosi 28870 V/m, što prelazi dozvoljene iznose za javna područja i dozvoljene iznose za profesionalne izloženosti. Bitno je napomenuti da ti maksimumi nastaju ispod metalne ograde, kojima čovjek ne može pristupiti.



Slika 5.30 Magnetsko polje oko ograde na razini zemlje



Slika 5.31. Sigurnosna zona magnetskog polja

Magnetsko polje na razini zemlje kod uzemljene ograde ima iste prijelaze ograničenja za javna područja duž svojeg koridora kao što je to slučaj i kod neuzemljene ograde. Tome ograde nema



nikakvog doprinosa je li uzemljena ili ne. No iz prikaza magnetskog polja sa slike 5.30. vidljivo je da se stvaraju lokalni ekstremi u iznosi magnetskog polja u kutnim dijelovima ograde gdje se ograda spaja sa uzemljivačem. Razlog tomu je baš uzemljivački sustav kojeg obuhvaća magnetsko polje vodiča dalekovoda kojem teče struja kvara. Maksimalni iznos magnetskog polja iznosi  $1537 \mu\text{T}$ , što prelazi dopuštenja za javna područja i profesionalnu izloženost, no treba napomenuti da je to još jedan slučaj mjesta kojemu čovjek ne može fizički pristupiti.

## 6. ZAKLJUČAK

Prilikom izrade ovog diplomskog rada napravljen je model mreže dalekovoda unutar XGSlab softvera. Dalekovod je dvosistemske izvedbe 400 kV razine i na njegovom koridoru se nalazi jedna metalna ograda koja se sastoji od dijelova koji su okomiti i paralelni s obzirom na dalekovod. Simulacije su se odrađivale pri normalnom pogonskom stanju i pri stanju kratkog spoja. Za svako to pojedinačno stanje se analizirale odrađene vrijednosti električnih veličina u ovisnosti je li metalna ograda uzemljena ili ne. Od analize električnih veličina vršio se proračun porasta potencijala metalne ograde te porast potencijala okolnog zemljišta s obzirom na neutralnu zemlju, analizirali su se sigurnosne zone napona koraka i napona dodira metalne ograde. Osim brojčanih vrijednosti, rezultati analize su se prikazivali i grafički radi lakšeg shvaćanja. Također su se analizirali vrijednost električnog i magnetskog polje te njihove sigurnosne zone u blizini ograde.

Prvi slučaj analize je kod normalnog pogonskog stanja gdje kroz oba sustava na dalekovodu vodičima teku pogonske struje od 1500 A. Kod neuzemljene ograde inducira se potencijal od 92,35 V, a razdioba potencijala zemljišta u blizini metalne ograde se ostvaruje isključivo pomoću prijelaza potencijala ograde preko metalnih stupića koji su u kontaktu sa zemljom. Takav kontakt rezultira da je potencijalni lijevak zemljišta ekstremno strm i maksimalni potencijal zemljišta je 92,35 V što je potencijal ograde. Sigurnosna analiza napona dodira i napona koraka ukazuje da su obje vrijednosti prešle dozvoljene vrijednosti trajno dopuštenih napona dodira i koraka i time predstavljaju opasnost za ljudsko zdravlje. Analizom rezultata simulacije električnog polja na razini zemlje se utvrđuje da se stvara iznos maksimalnog električnog polja od 28870 V/m, što prelazi dozvoljeni propisani iznos od 5000 V/m za javna područja. Također je vidljivo da je električno polje koncentrirano isključivo ispod ograde ispod metalnih stupova. Uzemljenje ovakve ograde se napravilo pomoću uzemljivača na dubini od 0,8 m, koji je povezan s metalnom ogradom samo na kutnim stupovima. Uzemljenje je smanjilo potencijal ograde i potencijal zemljišta gotovo na nulu, te sa time napon dodira i napon koraka više ne predstavljaju opasnost za ljudsko zdravlje. Električno polje na razini zemlje se smanjilo u odnosu na slučaj neuzemljene ograde. Jedino povišenje iznosa električnog polja se javlja ispod par metalnih stupića koji su okomito ispod vodiča dalekovoda gdje je jakost električnog polja 10610 V/m.

Drugi slučaj analize se odradio kod stanja jednofaznog kratkog spoja gdje vodičem koji je najniži teče struja od 15 kA i vrijeme trajanja kratkog spoja je 0,3 sekunde. Nastalo

elektromagnetsko polje uzrokuje porast potencijala ograde na 407,2 V, a potencijal zemljišta na maksimalnih 304,5 V. Sigurnosnom analizom se utvrđuje da se stvara maksimalni napon dodira od 352,2 V i maksimalni napon koraka je dosegno 365,2 V. Prema normi EN50522:2010 za trajanje od 0,3 sekunde, taj napon dodira ne stvara opasnost za čovjeka, dok napon koraka stvara tu opasnost. Električno polje kod ovog slučaja stvara maksimalnih 4497 V/m na razini zemlje i time ne stvara nikakvu opasnost za čovjeka jer ne prelazi propisane iznose za javna područja. Važno je napomenuti da kod kratkog spoja dominira magnetsko polje koje proporcionalno iznosu struje, dok je električno polje proporcionalno sa naponom vodiča dalekovoda. Magnetsko polje na razini zemlje koje se stvara zbog struje kratkog spoja uzrokuje prekoračenje ograničenja za javna područja, a najveći iznosi magnetskog polja od 181,9  $\mu\text{T}$  se stvara ispod metalnih stupića koji su okomito ispod vodiča dalekovoda. Uzemljenjem ove ograde smanjuje se inducirani potencijal na ogradi i potencijal okolnog zemljišta. Vidljivo je da se stvara nejednoliki potencijal duž ograde, gdje je veći potencijal na rubnim nego na unutarnjim dijelovima ograde. Rezultat toga je što je ograda uzemljena na samo kutnim stupićima. Kada bih se uzemljivala na svakom stupiću, potencijal metalne ograde bi bio veći u unutarnjim dijelovima nego na vanjskim. Potencijalni lijevak nije ekstremno strmog karaktera već zaobljenog karaktera. Sigurnosna analiza pokazuje da je stvara maksimalni napon dodira od 107,3 V i maksimalnih 105,3 V za napon koraka. Niti jedan od ovih napona ne predstavlja opasnost za ljudsko zdravlje. Na površini zemlje se stvara jače električno polje nego kod neuzemljene ograde, a razlog tomu je postojanje uzemljivača, koji je pod zemljom i on dodatno inducira električno polje. Maksimalni iznos električnog polje je 28870 V/m i stvara se ispod ograde, no to je mjesto kojem čovjek ne može fizički pristupiti i time ovo ne predstavlja rizični faktor za ljudsko zdravlje. Ista stvar se događa i kod magnetskog polja, gdje se stvara maksimalna vrijednost od 1537  $\mu\text{T}$  na mjestu ispod kutnih stupića.

## 7. SAŽETAK

Cilj ovog diplomskog rada je ukazati potencijalne opasnosti koje se stvaraju oko metalnih masa u neposrednoj blizini dalekovoda i načine smanjenja tih opasnosti. Unutar trećeg poglavlja su objašnjeni načini kojima dalekovod utječe na metalnu masu u svojoj blizini. Kako inducirani napon na metalnoj masi i nastala elektromagnetska polja ne smiju stvoriti opasnost za ljudsko zdravlje, inducirani naponi i elektromagnetska polja moraju zadovoljiti određene norme i pravilnike. Propisane pravilnike i norme te utjecaj elektromagnetskih polja na ljudsko zdravlje su prikazani unutar četvrtog poglavlja. Primjenom softverskog alata XGSlab napravljen je model mreže s dvosistemskim 400 kV dalekovod koji na svojem koridoru prelazi preko metalne ograde. Šesto poglavlje ovog rada opisuje parametre mreže, model mreže i rezultate simulacije za oba slučaja rada dalekovoda, slučaj normalnog rada i slučaj kratkog spoja. Kraj ovog rada donosi zaključak gdje se analiziraju i opisuju rezultati simulacija nastalih smetnji na metalnoj ogradi.

Ključne riječi: dalekovod, metalna masa, metalna ograda, elektromagnetsko polje, elektrostatsko polje, kapacitivni spoj, induktivni spoj, otporni spoj

## **8. ABSTRACT**

The aim of this master's thesis is to raise awareness of potential dangers that arise around metallic objects in the immediate vicinity of transmission lines and principles to reduce these hazards. Within the third chapter, there is explanation of methods how transmission lines interference with nearby metallic objects. Since the induced voltage on the metallic objects and the resulting electromagnetic fields must not create a danger to human health, induced voltages and electromagnetic fields must meet with certain norms and regulations. The prescribed regulations and norms and the impact of electromagnetic fields on human health are presented within the fourth chapter. Using the XGSlab software, a grid model was made with a double circuit 400 kV transmission line that passes over a metal fence on its corridor. The sixth chapter of this paper describes the grid parameters, grid model and simulation results for both cases of transmission line operation, the case of normal operation and the case of short circuits. The end of this paper contain conclusion where the results of simulations of the resulting disturbances on the metal fence are analyzed and described.

**Keywords:** transmission line, metallic objects, metallic fences, electromagnetic field, electrostatic field, capacitive coupling, inductive coupling, resistive coupling

## 9. LITERATURA

[1] Slika dvosistemskog dalekovoda

- URL: [https://www.dalekovod.hr/EasyEdit/UserFiles/News/dscn1363/dscn1363-636142009380064262\\_720\\_405.jpeg](https://www.dalekovod.hr/EasyEdit/UserFiles/News/dscn1363/dscn1363-636142009380064262_720_405.jpeg)

- Pristupljeno: 5.6.2021.

[2] „Electrostatic And Electromagnetic Effects of Overhead Transmission Lines“, REA Bulletin 62-4, United States Department of Agriculture, May 1976.

- URL: <https://mi-psc.force.com/sfc/servlet.shepherd/version/download/068t0000000vOGzAAM>

- Pristupljeno: 18.7.2021.

[3] Nasser Tleis, „An introduction to the analysis of electrical interference from power lines to metal pipelines. Power Systems Modelling and Fault Analysis“, 835–861, Jan 2019.

[4] Slika induktivnog spoja

-URL: [https://www.smar.com/uploads/images/2012\\_01\\_03-01.jpg](https://www.smar.com/uploads/images/2012_01_03-01.jpg)

- Pristupljeno: 1.8.2021.

[5] A. A. Hossam-Eldin, Wael Mokhtar, Ehab Mohamed Ali, „Effect of Electromagnetic Fields from Power Lines on Metallic Objects and Human Bodies“ in International Journal of Electromagnetics and Applications 2(6), 151-158, Nov 2012.

[6] Rogers, E., Hall, R., & White, J., „Fault in Ducte Voltages on Metallic Fencing Located in the Vicinity of a High Voltage Substation. IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems“, PAS-101(3), 746–750, Mar 1982.

[7] Problemi izlaganja EM valovima

- URL: <https://www.emfanalysis.com/ehs-symptoms/>

- Pristupljeno: 18.7.2021.

[8] Pravilnik o zaštiti od elektromagnetskih polja, NN 146/14.

[9] Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja, NN 31/19.

[10] Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja, NN 59/16.

[11] Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom, NN 88/12.

[12] Franjo Majdandžić, „Uzemljivači i sustavi uzemljenja“, 2004.

## 10. ŽIVOTOPIS

Tomislav Protić rođen je 28. srpnja 1997. godine u Požegi. Pohađao je osnovnu školu fra Kaje Adžića u Pleternici te nakon toga upisuje Tehničku školu u Požegi, smjer elektrotehničar gdje počinje biti zainteresiran za elektrotehniku i informatiku. Svoju zainteresiranost za elektrotehniku proširuje na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija u Osijeku, upisujući preddiplomski studij elektrotehnike i informacijskih tehnologija. 2019. godine postiže zvanje Sveučilišnog prvostupnika inženjera elektrotehnike, smjera Elektroenergetika. Iste godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjera Elektroenergetike i izborni blok DEA – Elektroenergetski sustavi. 2021. godine dobiva fakultetsko priznanje za postignuti uspjeh u studiranju, za prosjek 1. diplomske godine od 5,00.