

# Analiza induciranih napona na metalnim masama u blizini dalekovoda

---

Vida, Hrvoje

Master's thesis / Diplomski rad

2020

*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:200:183728>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-07-13**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**ANALIZA INDUCIRANIH NAPONA NA METALNIM  
MASAMA U BLIZINI DALEKOVODA**

**Diplomski rad**

**Hrvoje Vida**

**Osijek, 2020. godina**

# SADRŽAJ

|   |    |
|---|----|
| 1. UVOD .....   | 1  |
| 1.1. Zadatak diplomskog rada .....  | 1  |
| 2. PREGLED LITERATURE .....   | 2  |
| 3. INDUCIRANI NAPON CJEVOVODA.....  | 3  |
| 3.1. Svojstva dalekovoda i cjevovoda .....                                | 3  |
| 3.2. Elektrostatski inducirani napon (kapacitivni spoj) .....             | 4  |
| 3.3. Elektromagnetski inducirani napon.....                               | 5  |
| 3.4. Potencijalni rizici.....   | 8  |
| 3.5. Oštećenja premaza cjevovoda .....                                    | 8  |
| 3.6. Korozija metala .....  | 9  |
| 3.7. Metode za procjenu induciranog napona.....                           | 11 |
| 3.8. Zaštita i sustavi ublažavanja.....                                   | 13 |
| 4. PRAVILNICI I NORME.....  | 17 |
| 4.1. Izloženost na javnom području i području povećane osjetljivosti..... | 17 |
| 4.2. Profesionalna izloženost.....  | 18 |
| 4.3. Dopušteni trajni napon dodira .....                                  | 20 |
| 5. SIMULACIJA I REZULTATI.....  | 21 |
| 5.1. Opis modela.....   | 21 |
| 5.2. Analiza u normalnim uvjetima rada .....                              | 23 |
| 5.3. Analiza u slučaju kvara dalekovoda .....                             | 35 |
| 6. ZAKLJUČAK .....  | 45 |
| 7. SAŽETAK.....   | 47 |
| 8. ABSTRACT .....   | 48 |
| 9. LITERATURA.....  | 49 |
| 10. ŽIVOTOPIS .....   | 51 |

# 1. UVOD

Ubrzanim razvojem gospodarstva u svijetu naglo se povećava i potražnja za energijom kako bi se zadovoljile potrebe svjetske populacije. To zahtijeva i sve veći broj dalekovoda za prijenos električne energije kao i sve veći broj cjevovoda za transport energetske resursa (nafta, plin, voda). Zbog zemljopisnih ograničenja neizbježna je podjela zajedničkog puta između dalekovoda i cjevovoda što predstavlja veliki problem za inženjere dizajna. Razlog tome su elektromagnetske smetnje uzrokovane nadzemnim dalekovodima na paralelne susjedne cjevovode. Elektromagnetske smetnje generiraju inducirani napon na cjevovodu koji ovisi o električnim karakteristikama oba sustava, duljini paralelnog pružanja, udaljenosti između dalekovoda i cjevovoda, otpornosti tla, itd. Smetnje su prisutne u normalnim uvjetima rada te u slučaju kvara dalekovoda (kratki spoj). Posebice su opasne u slučaju kvara jer mogu ugroziti ljude koji rade na održavanju cjevovoda te pri tome dodiruju metalne cjevovode ili metalne konstrukcije povezane s njim. Nadalje, mogu uzrokovati oštećenje premaza cjevovoda, ubrzati proces korozije cjevovoda, oštetiti izolacijske spojeve cjevovoda te mogu oštetiti i sustave katodne zaštite. Zbog svega navedenog potrebno je reducirati inducirani napon uz pomoć sustava za ublažavanje. Mjerenjem i simulacijama potrebno je odrediti iznos induciranih napona te na kojim dijelovima cjevovoda njegova vrijednost premašuje propisane norme za zdravlje čovjeka.

## 1.1. Zadatak diplomskog rada

U diplomskom radu potrebno je objasniti mehanizam nastanka induciranih napona na metalnim masama u blizini dalekovoda. Nadalje, potrebno je izraditi računalni model dalekovoda i ukopanog cjevovoda koji se nalazi ispod dijela trase dalekovoda. Na računalnom modelu potrebno je izvršiti simulacije te odrediti međudjelovanje dalekovoda i cjevovoda.

## 2. PREGLED LITERATURE

U literaturi [1]-[3] opisan je međusobni električni utjecaj i elektromagnetske smetnje između visokonaponskih dalekovoda i obližnjih metalnih cjevovoda. Utjecaj udara munje u toranj dalekovoda te simulacija struje duž tornjeva i proračun prenapona, opisani su u radu [4]. Vrste smetnji (kapacitivne, konduktivne, induktivne) te njihova duljina trajanja opisane su u literaturi [5]-[6]. Također je opisana i vrijednost induciranog napona na cjevovodima obrazložena formulama i slikama. Prikladna konfiguracija nadzemnog dalekovoda te njegova udaljenost od zakopanih cjevovoda radi ublažavanja induciranog napona prikazana je u radu [7]. Proračun induktivnih smetnji na nesavršeno premazanim cjevovodima zbog utjecaja dalekovoda, opisan je pomoću hibridne metode u radu [8]. U literaturi [9] izračunat je inducirani napon duž cjevovoda u normalnim radnim uvjetima dalekovoda te u slučaju kvara dalekovoda. Za oba uvjeta rada dizajnirani su i uspoređeni sustavi ublažavanja induciranog napona. Korozivni učinci elektromagnetske indukcije na zakopani metalni cjevovod opisani su u literaturi [10]-[12]. Također je opisan učinak promjene gustoće struje na stopu korozije. U literaturi [13] predloženo je trodimenzionalno rješenje problema za procjenu induciranih elektromagnetskih smetnji, primjenom dvodimenzionalnog pristupa konačnih elemenata. Različite metode i sustavi ublažavanja kao što su polarizacijske ćelije, PSO metoda itd. opisane su u literaturi [14]-[17]. U literaturi [18]-[19] opisane su norme i pravilnici o zaštiti radnika i osoblja od elektromagnetskog polja, te o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom.

### 3. INDUCIRANI NAPON CJEVOVODA

#### 3.1. Svojstva dalekovoda i cjevovoda

Dalekovod je elektroenergetski nadzemni vod, jake struje visokog i najvišeg napona koji služi za prijenos električne energije, uglavnom velikih snaga te na velike udaljenosti. Sastoji se od vodiča, izolatora, stupova, zaštitnih užeta i od različitih dodatnih dijelova. Vodiči za prijenos električne energije postavljaju se visoko iznad zemlje zbog opasnosti od visokog napona za okolinu. Izrađuju se u obliku užeta sukanjem pojedinih žica i to uglavnom od aluminija ili aluminijevih slitina. Najčešće se izvode kao kombinacija dviju žica, jedna za vođenje struje (aluminij), a druga za preuzimanje mehaničkih naprezanja (čelik). Takav vodič se naziva i *alučel* vodič. Stupovi dalekovoda služe za nošenje električnih vodiča, a izrađuju se uglavnom kao čelične rešetkaste konstrukcije. Između stupa i vodiča nalaze se izolatori koji su najčešće izrađeni od porculana, kaljenog stakla ili sintetskih materijala pojačanih staklenim vlaknima. Oni sprječavaju da struja teče kratkim putem između vodiča ili kroz stupove u zemlju i s time daju dalekovodu potrebnu električnu čvrstoću. Ovjesni izolatori su najčešća izvedba, a postoje još i masivni, štapni, kapasti, potporni. Zaštitno uže služi za zaštitu od atmosferskih prenapona koji nastaju pri udaru munje te za zaštitu prilikom kratkog spoja između vodiča i zemlje (preuzimaju na sebe dio struje koji bi inače tekao kroz zemlju). Primjer dalekovodnog stupa prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Stup dalekovoda

Dalekovodima se električna energija prenosi od elektrana do transformatorskih stanica u blizini gradova, velikih industrijskih postrojenja i slično.

Tijekom godina različite službe bile su prisiljene dijeliti iste distribucijske koridore za svoje mreže. Glavni razlozi za to bili su strogi propisi o zaštiti okoliša koji su otežali i utrošili vrijeme na izbor drugog koridora te veći financijski troškovi koje bi donio novi koridor [1]. Zbog zajedničke podjele koridora na pojedinim trasama vodiči dalekovoda preklapaju se s metalnim masama (cjevovodima) te dolazi do uzrokovanja inducirano napona. Ovim problemom bavila su se mnoga istraživanja.

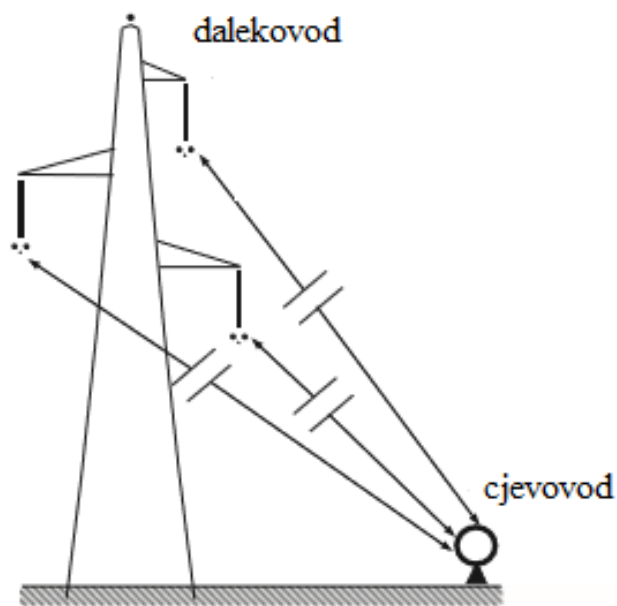
Transport cjevovodima koristi se diljem svijeta jer je učinkovit, praktičan te ekonomski prihvatljiv. Metalni cjevovodi se obično sastoje od čeličnih cijevi koje se međusobno zavaruju i koriste za prijevoz različitih tvari kao što su sirova nafta, prirodni plin, voda, ukapljeni naftni plinovi i kanalizacija [2]. Cjevovodi su uglavnom zakopani u zemlji, ali mogu biti postavljeni i iznad zemlje, dok se njihove duljine mogu kretati do čak tisuće kilometara.

Smetnje izazvane dalekovodima su inducirani naponi na metalu cjevovoda te se događaju u uvjetima normalnog rada i za vrijeme kratkog spoja dalekovoda. Kada visokonaponski izmjenični dalekovod radi normalno, struja i napon će promijeniti elektromagnetsko polje u prostoru. Prema teoriji elektromagnetskog polja, izmjenično elektromagnetsko polje generirat će induciranu elektromotornu silu i induciranu struju u zakopanom cjevovodu [3].

Cjevovod je podložan smetnjama koje proizlaze iz tri dijela, kapacitivnog, induktivnog i otpornog spoja [4].

### **3.2. Elektrostatski inducirani napon (kapacitivni spoj)**

Kapacitivne smetnje proizvode se električnim poljem u neposrednoj blizini dalekovoda te utječu samo na dijelove cjevovoda koji su iznad zemlje. Na cjevovod koji je zakopan u zemlji ne utječu jer ga zemlja štiti, odnosno zemlja djeluje kao elektrostatski štit. Kapacitivni spoj djeluje kao kapacitivni razdjelnik napona, a cjevovod uzima napon u odnosu na tlo. Ovi poremećaji javljaju se uglavnom pri normalnom radu dalekovoda, ali mogu se javiti i u slučaju kvara. Kapacitivne smetnje su zanemarive i od male važnosti te ih je moguće lako riješiti uzemljenjem cjevovoda. Primjer kapacitivnog spoja dalekovoda i cjevovoda prikazan je na slici 3.1.



Slika 3.1. Ilustracija kapacitivnog spoja između dalekovoda i cjevovoda [2]

S nadzemnim, zavarenim dužinama cijevi koje su izolirane od tla i koje se nalaze unutar 10 m od nadzemnih vodova, potrebno je poduzeti mjere protiv nedopuštenih kapacitivnih smetnji ako su prekoračene sljedeće duljine granica [5]:

- 200 m trofaznih nadzemnih dalekovoda s nazivnim naponom većim ili jednakim 110kV

### 3.3. Elektromagnetski inducirani napon

Jedan od najvećih uzroka indukcije napona na cjevovodu su linijske struje koje teku u vodičima stvarajući elektromagnetska polja koja uvijek leže pod pravim kutom na struju koja ga proizvodi. Magnetsko polje koje varira u vremenu inducirati će električno polje u bilo kojoj određenoj petlji u svojoj blizini [6]. Jakost magnetskog polja  $E$  u homogenom magnetskom polju u blizini petlje iznosi:

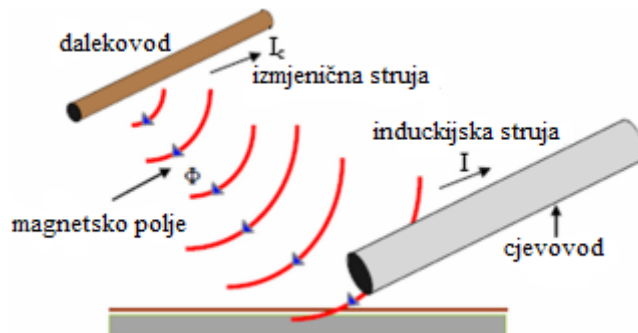
$$E = \frac{dB}{dt} \times \frac{r}{2} \quad (3-1)$$

gdje je  $\frac{dB}{dt}$  brzina promjene magnetskog polja a  $r$  kružni tok polumjera. Inducirati će se i struja gustoće  $J$ :



$$J = gE = g \frac{dB}{dt} \times \frac{r}{2} \quad (3-2)$$

gdje je  $g$  srednja vodljivost.

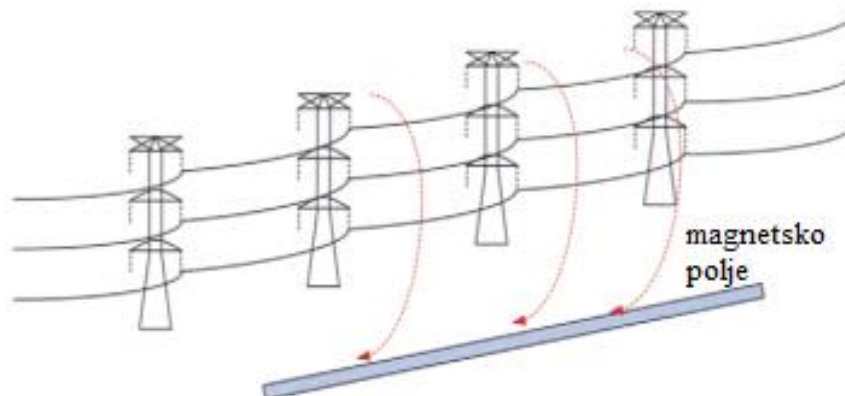


Slika 3.2. Magnetski spoj između cjevovoda i dalekovoda [16]

Izmjenične smetnje u cjevovodu koji dijeli isti koridor s dalekovodom sastoje se od induktivnih i konduktivnih komponenti [7]. Jakost inducirano napona ovisi o strujama tri faze dalekovoda, dok u slučaju kratkog spoja dalekovoda ovisi o veličini struje kvara.

Uzdužna inducirana EMS ovisi o udaljenosti između dalekovoda i cjevovoda te o duljini paralelnog pružanja. Inducirana EMS smanjuje se povećanjem udaljenosti razdvajanja, ali se povećava dužinom izloženosti [2].

Induktivne smetnje u cjevovodu nastaju zbog inducirano magnetskog polja koje generira dalekovod, a mogu se pojaviti u normalnim radnim uvjetima te u slučaju kvara dalekovoda. Induktivni spoj od dalekovoda do metalnog cjevovoda prikazan je na slici 3.3.



Slika 3.3. Induktivni spoj [14]

Jakost induksijskog spoja između električnog kruga dalekovoda i cjevovoda jest:

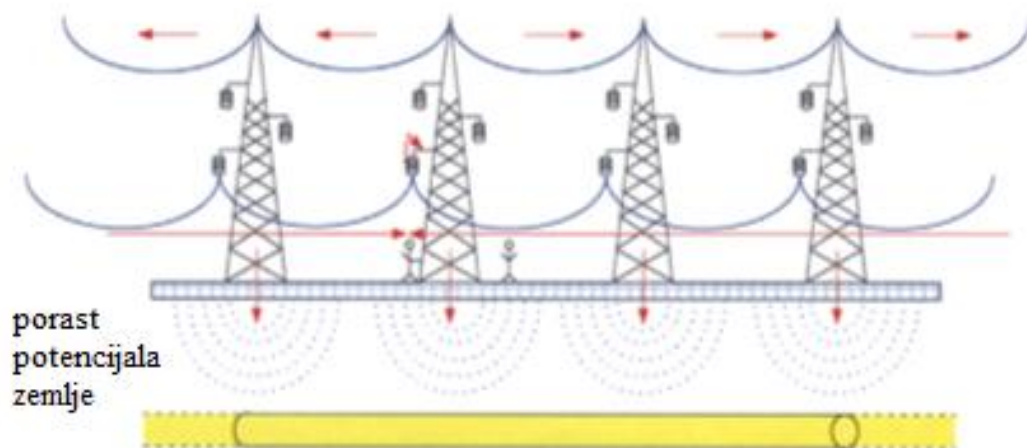
$$M = K(L_t L_p)^{\frac{1}{2}} \quad (3-3)$$

gdje je  $L_t$  induktivitet dalekovoda,  $L_p$  induktivitet cjevovoda i opreme dok je  $K$  koeficijent spajanja ovisan o lokaciji.

Inducirana struja  $I$  u cjevovodu, uz otpor zemlje  $R$  iznosi:

$$I = \frac{M}{R} \frac{dI}{dt} = K \frac{(L_t L_p)^{\frac{1}{2}}}{R} \frac{dI}{dt} \quad (3-4)$$

Konduktivna smetnja obično proizlazi kada struktura dalekovoda injektira veliku struju magnetiziranja u zemlju tijekom jednofaznog kratkog spoja i time podigne potencijal tla u blizini konstrukcije [7]. Povećanjem protoka struje u zemlju povećati će se i potencijal uzemljenja te će cjevovod koji se nalazi u blizini biti podložan tom potencijalu. To uzrokuje povećanje napona te napona koraka. Potencijal tla se smanjuje povećanjem udaljenosti od mjesta ispuštanja struje. Do konduktivnog spoja može doći i prilikom udara munje u dalekovod. Kada munja udari u dalekovod, odvijat će se induktivni i konduktivni spoj i dovesti će cjevovod u ozbiljan rizik [4]. Primjer induktivnog i konduktivnog spoja prikazan je na slici 3.4.



Slika 3.4. Induktivni i konduktivni spoj [14]

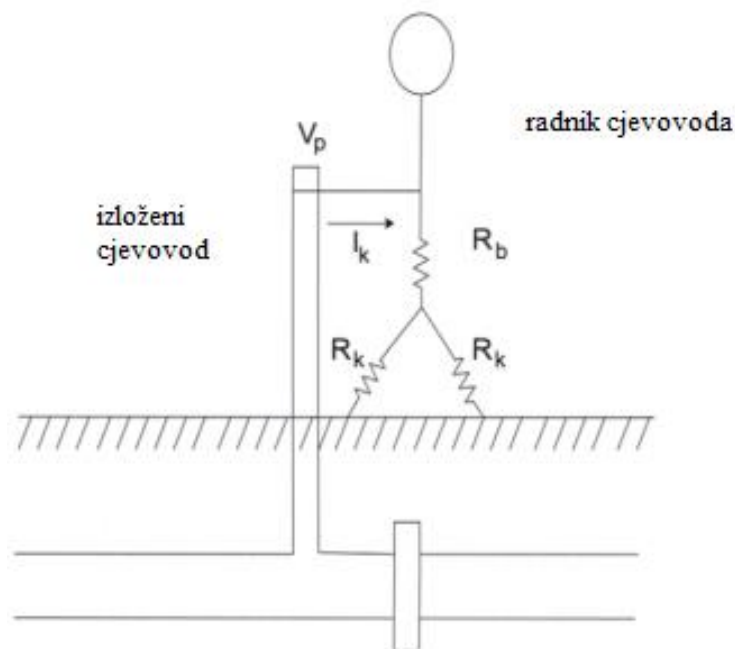
Uzdužno inducirani napon  $V$  između dva kraja izloženog dijela biti će [6]:

$$V = K \times I \times S \times C \quad (3-5)$$

gdje je  $S$  duljina zajedničkog koridora (km), a  $C$  faktor zaštite ( $0 < C < 1$ ).

### 3.4. Potencijalni rizici

Inducirani naponi i struje uzrokovani elektromagnetskim smetnjama mogu biti opasni za sigurnost ljudi koji rade na održavanju cjevovoda te za sustave katodne zaštite. Osobe koje su u kontaktu sa cjevovodom u opasnosti su od električnog udara bilo da dodiruju cjevovod ili da jednostavno stoje u blizini. Ta opasnost ovisi o veličini i trajanju struje ubrizgane u tijelo. Nadalje, povećava se mogućnost oštećenja premaza cjevovoda, izolacijskih prirubnica ili ispravljača te se ubrzava korozija metala [8]. Stoga je sigurnost cjevovoda vrlo važna. Primjer električnog udara na osobe koje dodiruju cjevovod prikazan je na slici 3.5.



Slika 3.5. Električni udar [14]

Mnoge zemlje navode maksimalne dopuštene napone dodira kako bi zaštitile radnike na cjevovodima. U stalnim ili stabilnim uvjetima najveći dopušteni napon dodira obično varira od 15 do 65V (rms). U kratkotrajnim stanjima kvara, raspon je od 300 do 1500V, ovisno o vremenu uklanjanja kvara [2].

### 3.5. Oštećenja premaza cjevovoda

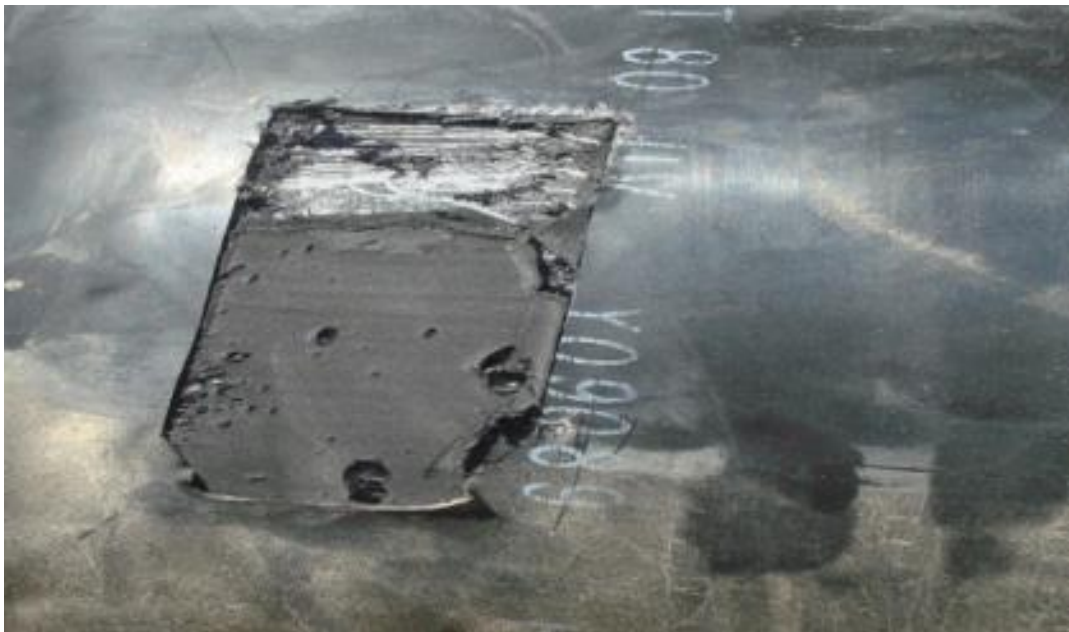
Smatralo se da cjevovod ima savršen premaz, što je rijetko slučaj budući da se pojavljuju nedostaci na premazu nedugo nakon što se cjevovod zakopa u zemlju [9]. Jedan od glavnih uzroka oštećenja premaza su vrtložne struje koje se ispuštaju iz cjevovoda u zemlju. Mogu se pojaviti u normalnim

radnim uvjetima ali ozbiljan učinak imaju u slučaju kvara dalekovoda te imaju kapacitivan učinak. Struja pražnjenja cjevovoda iznosi:

$$I_{disc} = \frac{V_{ac}}{Z_{ct}} \quad (3-6)$$

gdje je  $V_{ac}$  inducirani napon cjevovoda u normalnim radnim uvjetima ili inducirani napon uzrokovan induktivnim i konduktivnim spojem u slučaju jednofaznog kratkog spoja, a  $Z_{ct}$  je ukupna impedancija.

Nedostaci na premazima cjevovoda česta su činjenica, osobito u starijim cjevovodima, a mogu se kretati od nekoliko milimetara do nekoliko decimetara. Ispuštanje sjaja može se pojaviti kod oštećenja ili pora kada inducirani napon na cjevovodu prelazi 1 kV [8]. Premaz cjevovoda može se oštetiti i prilikom udara munje u dalekovod gdje struja ispuštanja u zemlju može oštetiti sloj, te prilikom potresa. Oštećenjem premaza dolazi do povećane korozije metalnih cjevovoda. Primjer mjehurića zraka premaza cjevovoda prikazan je na slici 3.6.



Slika 3.6. Mjehurići zraka premaza cjevovoda [11]

### 3.6. Korozija metala

Korozija je elektrokemijska reakcija metala i njegovog okoliša što izaziva degradaciju metala [10]. Može se podijeliti u dvije skupine, na mehaničku koroziju i kemijsku koroziju. Budući da je cjevovod izložen raznim vremenskim uvjetima, može doći do njegovog pucanja prilikom previsokih ili preniskih temperatura te zbog prevelikog pritiska i tada dolazi do mehaničke

korozije. Kemijska korozija metalnog cjevovoda nastaje ako se cjevovod provodi kemijskim materijalima niske aktivnosti gdje se stvara galvanska stanica [11]. Neplemenitiji dijelovi površine se ponašaju kao anode, a plemenitiji dijelovi površine kao katode. Dolazi do procesa oksidacije odnosno ionizacije metala gdje se atomi metala gubitkom elektrona pretvaraju u slobodne ione.

Ukoliko postoje visokonaponski dalekovodi u blizini, zakopani cjevovodi su u riziku od AC korozije [12]. Korozija nastaje zbog smetnji između cjevovoda i visokonaponskih dalekovoda, induciranjem napona na cjevovodu koji stvara izmjeničnu struju koja prolazi između cijevi i zemlje. Gustoća struje računa se prema sljedećoj formuli:

$$J_{ac} = \frac{V_{ac}}{R A} \quad (3-7)$$

gdje je  $V_{ac}$  inducirani napon na cjevovodu,  $R$  je otpor rasprostiranja i  $A$  je površina ispuštanja. Povećanjem gustoće izmjenične struje povećava se i stopa korozije.

Korozija uzrokuje štete poput istjecanja plina, vode ili nafte te u najgorem scenariju može doći i do eksplozije zbog zapaljivih karakteristika. Neki od faktora koji utječu na koroziju cjevovoda su otpornost tla, pH vrijednost, sadržaj vode, sadržaj topljivih tvari, potencijal zemlje plinovoda itd. Primjer korozije na metalnom cjevovodu prikazan je na slici 3.7.



Slika 3.7. AC korozija cjevovoda [9]

Kako bi se smanjila vjerojatnost AC korozije na zakopanim cjevovodima koji podliježu AC smetnjama, inducirani napon na njima u ni kojem trenutku ne smije prelaziti sljedeće vrijednosti [1]:

- 10V ako je otpornost lokalnog tla veća od 25 ohm/m
- 4V ako je otpornost lokalnog tla manja od 25 ohm/m

Stopa korozije može se smanjiti racionalnim izborom konstrukcijskog materijala, zaštitnim presvlačenjem (metalne, nemetalne, organske prevlake), tehnološkim mjerama, smanjenjem agresivnosti medija, anodnom i katodnom zaštitom itd. Za premaz starih cjevovoda koristio se bitumen ili staklena krpa, dok se za nove premaze koristi poli-etilen.

### **3.7. Metode za procjenu induciranog napona**

#### 3.7.1. Hibridna metoda

Za procjenu i izračun napona i struja na cjevovodu kao i struje koja teče u zemlju kroz nedostatke premaza koristi se hibridna metoda. Metoda kombinira Faraday-ev zakon, FEM kalkulacije te analizu standardnih krugova. Neki od potrebnih podataka za izračun su geometrijska konfiguracija cjevovoda i dalekovoda, fizikalna svojstva cjevovoda i vodiča, vrijednost otpora istjecanja struje, karakteristike zemlje i zraka, tip kvara itd.

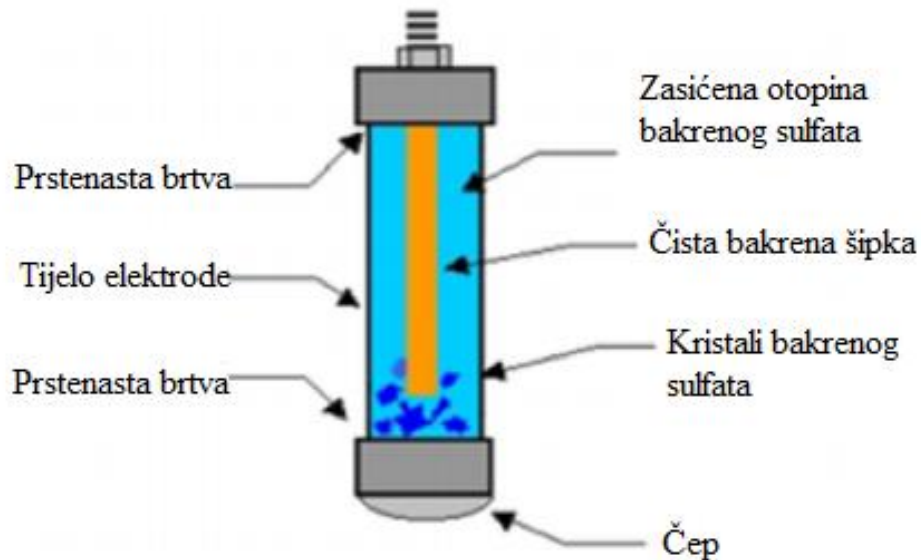
Prvi korak metode je konstruiranje 2D modela koji predstavlja presjek proučavanog problema smetnje [1]. Nakon toga, softverom za metodu konačnih elemenata, analizira se model i procjenjuje vrijednost vlastite i međusobne impedancije između svih vodiča. Prednost ovog pristupa jest da se mogu uzeti u obzir složene geometrije.

#### 3.7.2. QUAZI 3D metoda

Cilj ove metode je pružiti inherentno trodimenzionalno rješenje problema, primjenom dvodimenzionalnog pristupa konačnih elemenata [13]. Analizirani dio spaja se s ostatkom sustava kružnim pristupom trodimenzionalnog proširenja. Provedena analiza na dionici koridora, zajedno s električnom mrežom, pruža dublji uvid u problem te omogućava distribuciju elektromagnetskih polja na analiziranu geometriju. Razne komponente ove metode omogućuju uzimanje u obzir nesavršenosti fizičkih učinaka, kao što su temeljni elementi i nesavršeni slojevi cjevovoda. Metoda služi za izračun induciranih napona i struja cjevovoda a u obzir se uzimaju i utjecaji nehomogenosti tla. Na točnost ove metode ne utječe broj i vrsta vodiča a dobiveni rezultati su pouzdani i konzistentni.

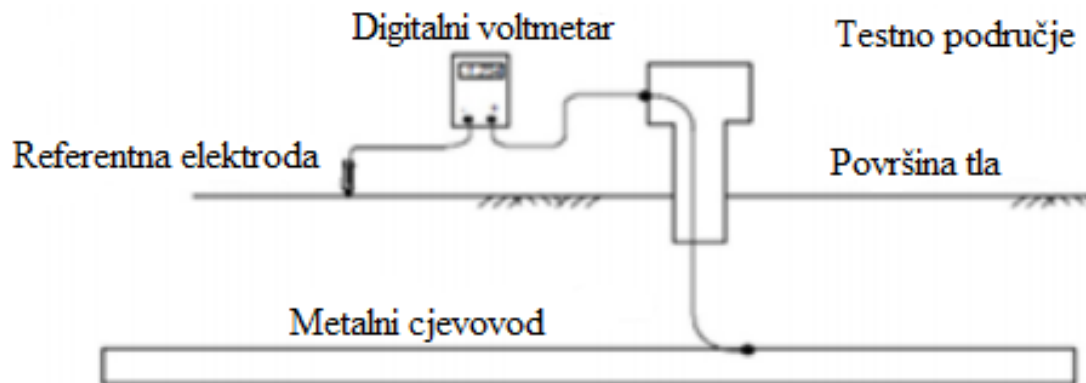
### 3.7.3. Cu-CuSO<sub>4</sub> elektroda

Cu-CuSO<sub>4</sub> referentna elektroda je jednostavna elektrokemijska ili galvanska ćelija koja poput baterije koristi kemijsku reakciju za stvaranje električne struje [11]. Sastoji se od dvije polu-ćelije od kojih jedna koristi bakrenu elektrodu koja se uranja u elektrolit, kao što je prikazano na slici 3.8.



Slika 3.8. Cu-CuSO<sub>4</sub> referentna elektroda [11]

U kombinaciji sa digitalnim voltmetrom mjeri inducirani napon cjevovoda odnosno potencijal između referentne elektrode i cjevovoda. Elektroda se postavlja preko cjevovoda s poroznim čepom koji je u kontaktu sa vlažnom zemljom. U nekim područjima gdje je zemlja iznimno suha potrebno je ovlažiti područje oko elektrode da bi se uklonila ili smanjila pogreška prilikom očitavanja rezultata. Metoda mjerenja rezultata prikazana je na slici 3.9.



Slika 3.9. Ilustracija mjerenja induciranih napona cjevovoda [11]

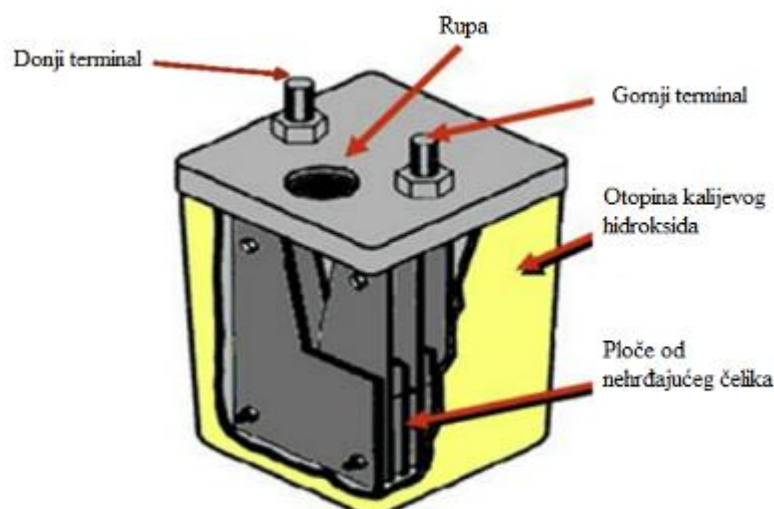


### 3.8. Zaštita i sustavi ublažavanja

Izbor odgovarajuće metode ublažavanja zahtijeva detaljno razumijevanje relevantnih parametara i fizičkih mehanizama koji utječu na naponske razine induciranih cjevovoda [14]. Neke od tehnika ublažavanja, poput ugradnji točaka uzemljenja na cjevovodu, zahtijevaju oprez jer može doći do korozije cjevovoda.

#### 3.8.1. KOH-PC ćelija

Stanica za polarizaciju kalijevog hidroksida (KOH-PC) je elektrokemijski sigurnosni preklopnik koji djeluje kao točka uzemljenja [15]. Zadatak ove ćelije jest da odvodi, odnosno rasprši inducirane napone u zemlju. Sastoji se od gornjeg terminala koji je spojen na cjevovod te donjeg terminala koji je spojen u zemlju. KOH-PC je sastavljen od više parova ploča nehrđajućeg čelika uronjenih u KOH otopinu elektrolita. Gornja ploča mjeri napon cjevovoda dok donja ima napon približno nula te se nalaze na određenoj udaljenosti jedna od druge. Između ploča se nalazi elektrolitska otopina KOH-a i zrak. Primjer konstrukcije KOH polarizacijske ćelije nalazi se na slici 3.10.



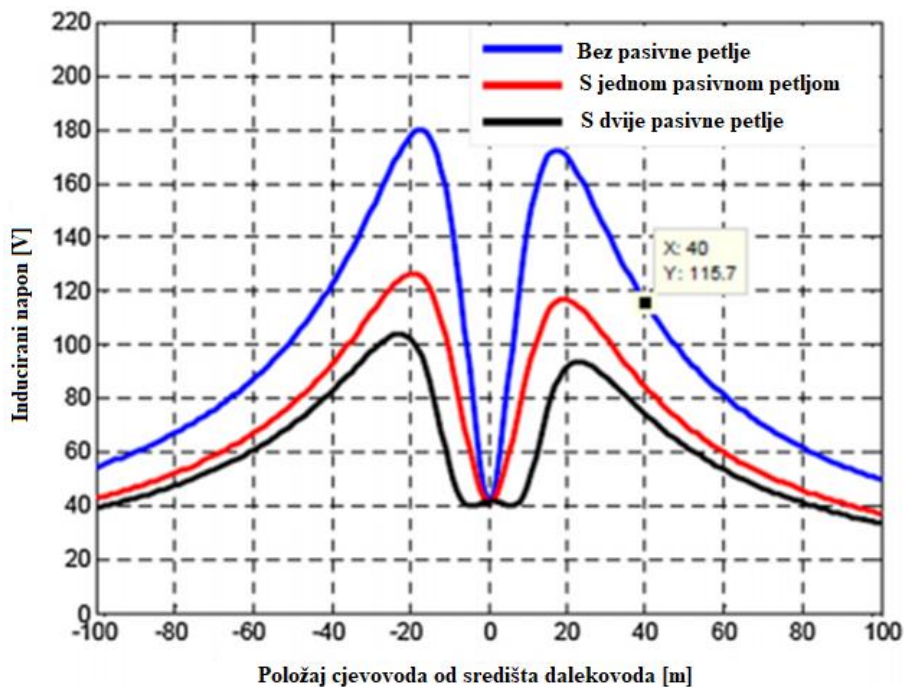
Slika 3.10. Ilustracija KOH polarizacijske ćelije [15]

Postavljanjem KOH-PC-a na mjestima najviših vrijednosti induciranih napona duž cjevovoda, moguće je smanjiti ili eliminirati potencijalne električne opasnosti poput oštećenja premaza, izazivanja korozije ili električnoga udara za operatere i osoblje koje rade na održavanju cjevovoda.

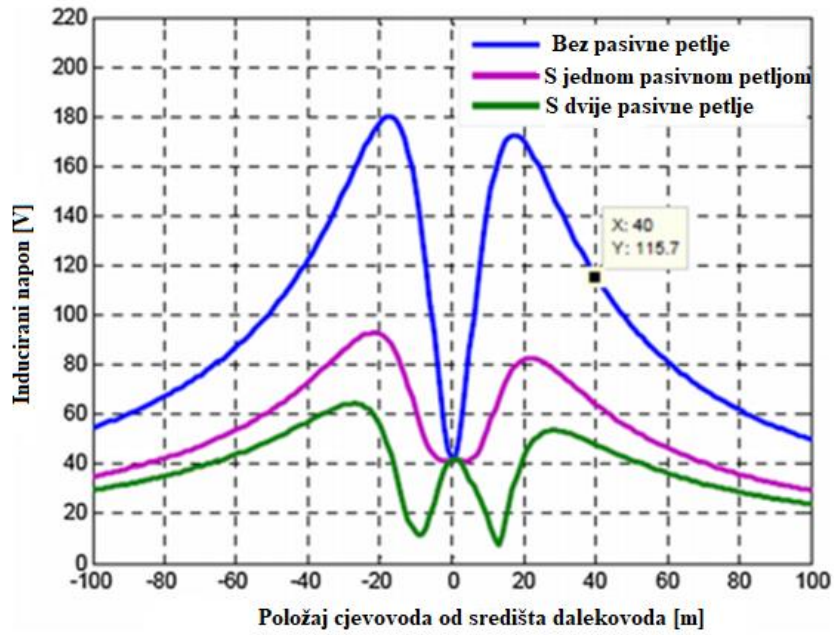


### 3.8.2. PSO metoda

PSO metoda u prijevodu znači optimizacija rojem čestica te se koristi u kombinaciji s tehnikom pasivne petlje. Služi za smanjenje inducirano napona te se koristi za pronalazak optimalnih rješenja za kvalitativne i numeričke probleme. Učinkovitost ublažavanja značajno se poboljšava optimizacijom položaja vodiča petlje s povećanjem broja petlji i upotrebom zaštitnog magnetskog materijala s visokom relativnom permeabilnosti [16]. Primjenjuje se u raznim područjima elektroenergetike i visokonaponskog inženjeringa. U radu [16] modelirano je magnetsko polje i njegovo ublažavanje između metalnih cjevovoda i susjednih dalekovoda. Rezultati su prikazali kako je inducirani napon na cjevovodu manje intenzivan u središtu, dok raste kako se udaljava od centra. Usporedba rezultata sa različitim vrijednostima relativnih permeabilnosti prikazani su na slikama 3.11. i 3.12.

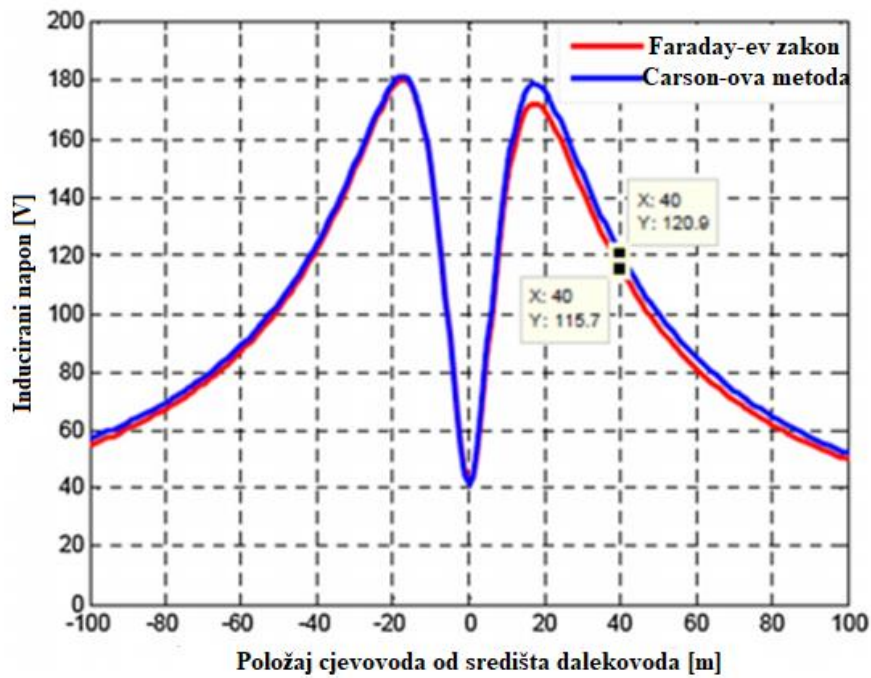


Slika 3.11. Inducirani napon cjevovoda sa i bez pasivnog štita (materijal s relativnom permeabilnosti  $\mu_r=1$ ) [16]



Slika 3.12. Inducirani napon cjevovoda sa i bez pasivnog štita (materijal s relativnom permeabilnosti  $\mu_r=5$ ) [16]

Krajnji rezultati simulacija PSO metode uspoređuju se sa Carsonovim formulama da bi se utvrdila valjanost metode što je prikazano na slici 3.13.



Slika 3.13. Usporedba induciranih napona cjevovoda između simulacijskih metoda [16]

### 3.8.3. Ostale metode

Metoda gradijent-kontrola-žica temelji se na smanjenju otpora uzemljenja duž cjevovoda i time se smanjuje inducirani napon. Vrlo je učinkovita, ali nedostaci su joj instalacija te održavanje (nepristupačnost nakon što su zakopane za cjevovodom). Dodatno, zbog zaštite od zalutalih struja i njihovog protjecanja kroz sustav katodne zaštite, ova metoda zahtijeva instalaciju istosmjernog izolatora.

Kod metode poništavanja-žice, žica je uzemljena na dva kraja koja su u paraleli sa zakopanim cjevovodom. Budući da žica za poništavanje inducira struju iz istih dalekovoda, ta struja inducira i drugu elektromotornu silu na cjevovodu sa suprotnim faznim kutom elektromotorne sile inducirane direktno iz dalekovoda [17]. Na taj način se poništava dio elektromotorne sile na cjevovodu, koja se kontrolira s udaljenosti između cjevovoda i žice za otkazivanje.

Instalacijom izolacijskih prirubnica moguće je podijeliti cjevovod na dijelove, kako bi se smanjio inducirani napon. Međutim za vrlo dugačke cjevovode to znači i velik broj izolacijskih prirubnica čime su znatno povećani troškovi.

Neke od preporuka za ublažavanje smetnji te održavanje dalekovoda su:

- Izbjeći izgradnju cjevovoda i dalekovoda u područjima koje imaju visoku otpornost tla te u blizini trafostanica (velika vjerojatnost kratkog spoja)
- Minimizirati paralelno pružanje cjevovoda i dalekovoda i povećati njihovu međusobnu udaljenost
- Izbjeći točke uzemljenja na cjevovodu (mogućnost korozije)
- Koristiti podzemne cjevovode radi smanjenja rizika od strujnog udara na ljude
- Svesti vrijeme održavanja dalekovoda na minimum, posebice u lošim vremenskim uvjetima
- Obavezno korištenje izolacijskih rukavica i čizmi za rad na održavanju cjevovoda
- Vozila i dizalice za ugradnju cjevovoda zadržati na sigurnoj propisanoj udaljenosti od nadzemnih vodiča

## 4. PRAVILNICI I NORME

### 4.1. Izloženost na javnom području i području povećane osjetljivosti

Radnici i osoblje koje rade na održavanju cjevovoda moraju biti upoznati sa rizicima i opasnostima kojima su izloženi. U ovom slučaju to su utjecaji vremenski promjenjivih električnih, magnetskih i elektromagnetskih polja. Pravilnik o zaštiti elektromagnetskih polja izdan je 10. prosinca 2014. godine i u njemu se opisuju granične razine elektromagnetskih polja, postupci njihova provjeravanja i uvjeti za dobivanje ovlasti za obavljanje tih postupaka te uređuje zaštitu ljudi u javnom području, području povećane osjetljivosti i području profesionalne izloženosti. Pravilnik o izmjenama i dopunama Pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja izdan je 27. ožujka. 2019. te je uredio zaštitu ljudi u javnom području i području povećane osjetljivosti. Pod javne površine smatraju se mjesta gdje svjetska populacija ima neograničen pristup, u gradskim i seoskim sredinama.

Tablica 4.1. Granične razine referentnih veličina za javna područja [18]

| 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. Granične razine referentnih polja za područja povećane osjetljivosti [18]

| 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           | $4 \cdot 10^3$                     | $1.28 \cdot 10^4 / f^2$             | $1.6 \cdot 10^4 / f^2$                 | -   |
| 8 Hz-25 Hz          | $4 \cdot 10^3$                     | $1.6 \cdot 10^3 / f$                | $2 \cdot 10^3 / f$                     | -   |
| 25 Hz-800 Hz        | $\frac{10^5}{f}$                   | $1.6 \cdot 10^3 / f$                | $2 \cdot 10^3 / f$                     | -   |
| 0.8 kHz-3 kHz       | $\frac{100}{f}$                    | 2                                   | 2.5                                    | -   |
| 3 kHz-100 kHz       | 34.8                               | 2                                   | 2.5                                    | -   |
| 100 kHz-150 kHz     | 34.8                               | $\frac{175}{f}$                     | $\frac{220}{f}$                        | -   |
| 0.15 MHz-1 MHz      | 34.8                               | $\frac{0.292}{f}$                   | $\frac{0.368}{f}$                      | -   |
| 1 MHz-10 MHz        | $\frac{34.8}{\sqrt{f}}$            | $\frac{0.292}{f}$                   | $\frac{0.368}{f}$                      | -   |
| 10 MHz-400 MHz      | 11.2                               | 0.0292                              | 0.0368                                 | 0.326   |
| 400 MHz-2 GHz       | $0.55 \cdot \sqrt{f}$              | $1.48 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$ | $1.84 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{f}$    | $f / 1250$  |
| 2 GHz-10 GHz        | 24.4                               | 0.064                               | 0.08                                   | 1.6   |
| 10 GHz-300 GHz      | 24.4                               | 0.064                               | 0.08                                   | 1.6   |

Budući da je u parametrima modela zadana frekvencija od 50Hz, granične vrijednosti za javna područja iznosile bi za jakost električnog polja 5000 V/m, a za gustoću magnetskog toka 100  $\mu$ T.

#### 4.2. Profesionalna izloženost

Područjima profesionalne izloženosti se smatraju područja u kojima radnik obavlja sve poslove vezane za izvore elektromagnetskih polja 40 sati tjedno. Iako normalno obavlja sve poslove u kontroliranim uvjetima, radnik je upoznat s rizicima i opasnostima kojima je izložen [19]. Vrijednosti upozorenja dane su u tablicama 4.3. i 4.4.

Tablica 4.3. Vrijednosti upozorenja za izloženost električnim poljima od 1 Hz do 10 MHz [19]

| 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 4.4. Vrijednosti upozorenja izloženosti magnetskim poljima od 1 Hz do 10 MHz [19]

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

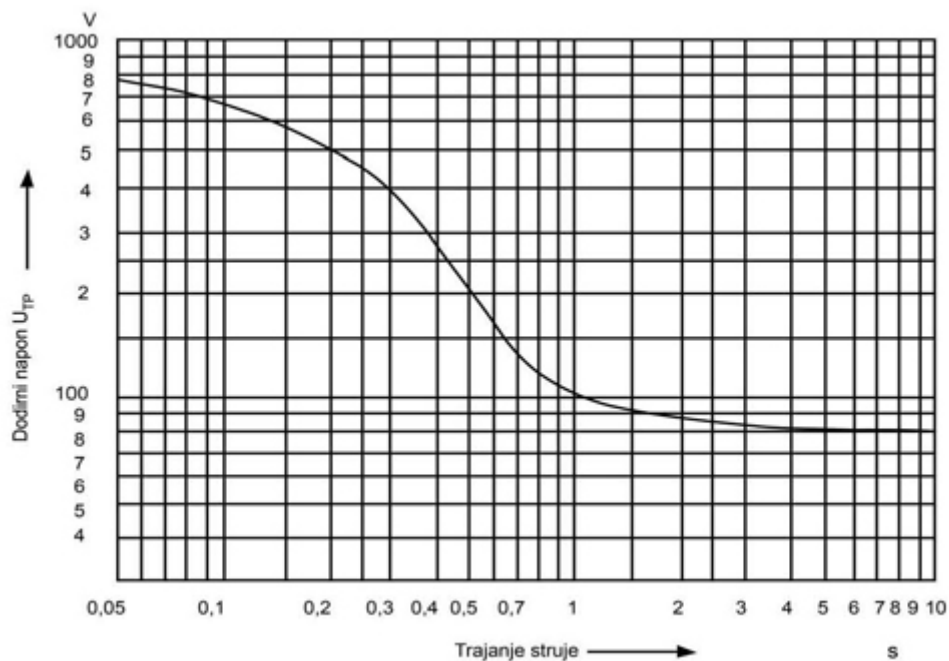
Budući da je u parametrima modela zadana frekvencija od 50Hz, granične vrijednosti za nisku vrijednost upozorenja za profesionalnu izloženost iznosile bi za jakost električnog polja 10000 V/m, a za gustoću magnetskog toka 1000  $\mu\text{T}$ .

### 4.3. Dopušteni trajni napon dodira

Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom izdan je 1. kolovoza 2012. godine i njegovom primjenom se otklanjaju opasnosti za sigurnost i zdravlje radnika i drugih osoba od djelovanje električne energije.

Prema članku 66. dopušteni trajni dodirni napon  $U_L$  unutar električnih postrojenja iznosi 50 V. Na nadzemnim vodovima s metalnom konstrukcijom stupova, trajno dopušteni dodirni napon iznosi 25V [20].

Na slici 4.1. prikazan je dijagram ovisnosti dopuštenog napona dodira o vremenu trajanja struje.



Slika 4.1. Dijagram dopuštenog dodirnog napona u odnosu na vrijeme trajanja struje [20]

## 5. SIMULACIJA I REZULTATI

### 5.1. Opis modela

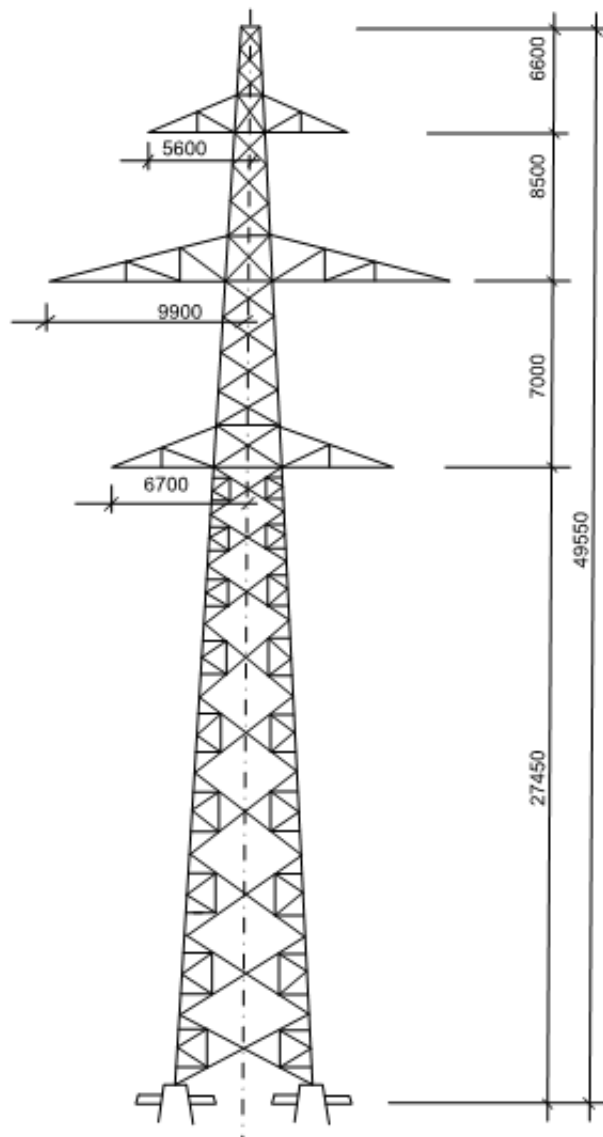
Simulacija je napravljena u programskom alatu XGSLab koristeći frekvencijske domene za prikaz električnog i magnetskog polja, u dijelu programa XGSA FD. Pomoću unosa koordinata u  $x,y,z$  koordinatnom sustavu nacrtane su dionice dalekovoda i cjevovoda, koje se preklapaju tj. paralelne su na određenom dijelu koridora. Duljina paralelnog puta iznosila je 2450 metara, dok je udaljenost između cjevovoda i središta stupa dalekovoda iznosila 10 metara.

Ulazni podaci su sljedeći:

- Niskofrekventna otpornost tla:  $100 \Omega\text{m}$
- Visokofrekventna relativna permeabilnost tla: 6
- Frekvencija: 50 Hz
- Duljina raspona: 350 m (sve su jednake zbog jednostavnosti)
- Maksimalna udaljenost između faznih vodiča i površine tla: 42.95 m
- Minimalna udaljenost između faznih vodiča i površine tla: 27.45 m
- Fazni vodiči: promjer snopa 462 mm; 3 ACSR podvodnika promjera 31.5 mm
- Niska razina fragmentacije

Geometrija stupa dalekovoda prikazana je na slici 5.1.





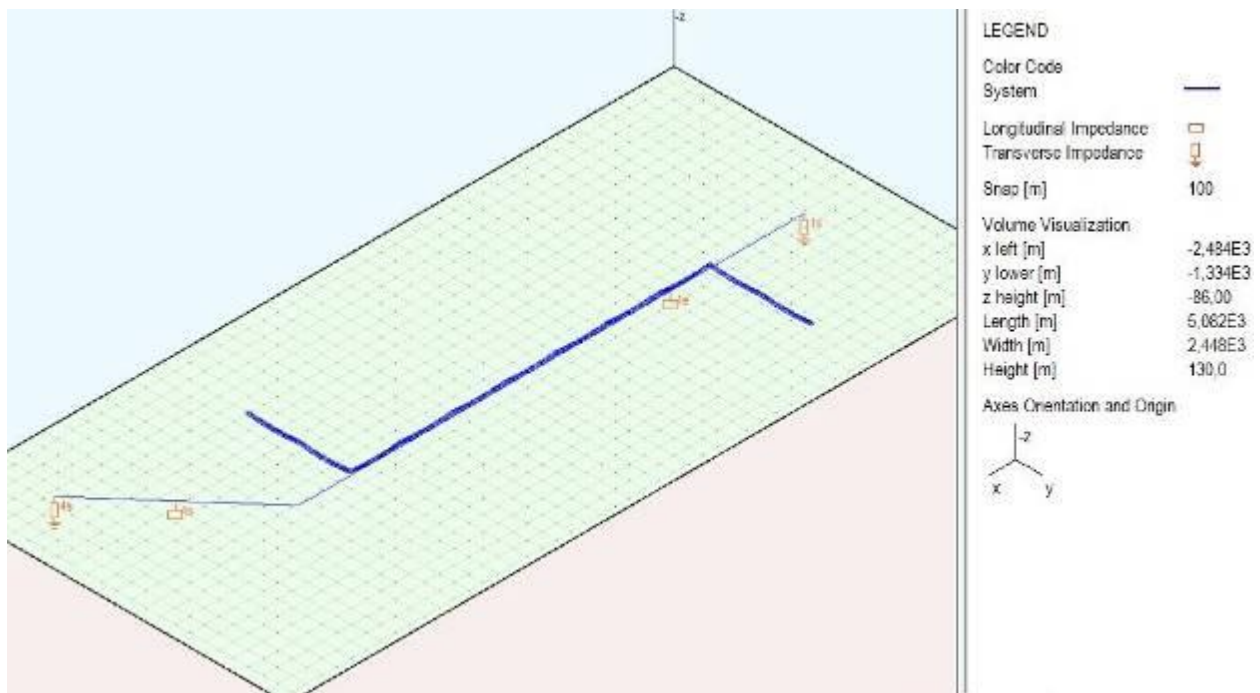
Slika 5.1. Stup dalekovoda

Podaci cjevovoda:

- Dubina: 1 m
- Vanjski promjer isključujući zaštitu: 300 mm
- Debljina metalnog dijela: 9.5 mm
- Debljina zaštite: 2.5 mm
- Starost 20 godina



Slika 5.2. 2D prikaz modela



Slika 5.3. 3D prikaz modela

## 5.2. Analiza u normalnim uvjetima rada

Napon i struja dalekovoda iznose 400 kV i 1500 A, ali zbog različitih kutova pojedine faze napon i struja su uneseni u kompleksnom obliku.

Struje faza dobivene su preko sljedećih relacija:

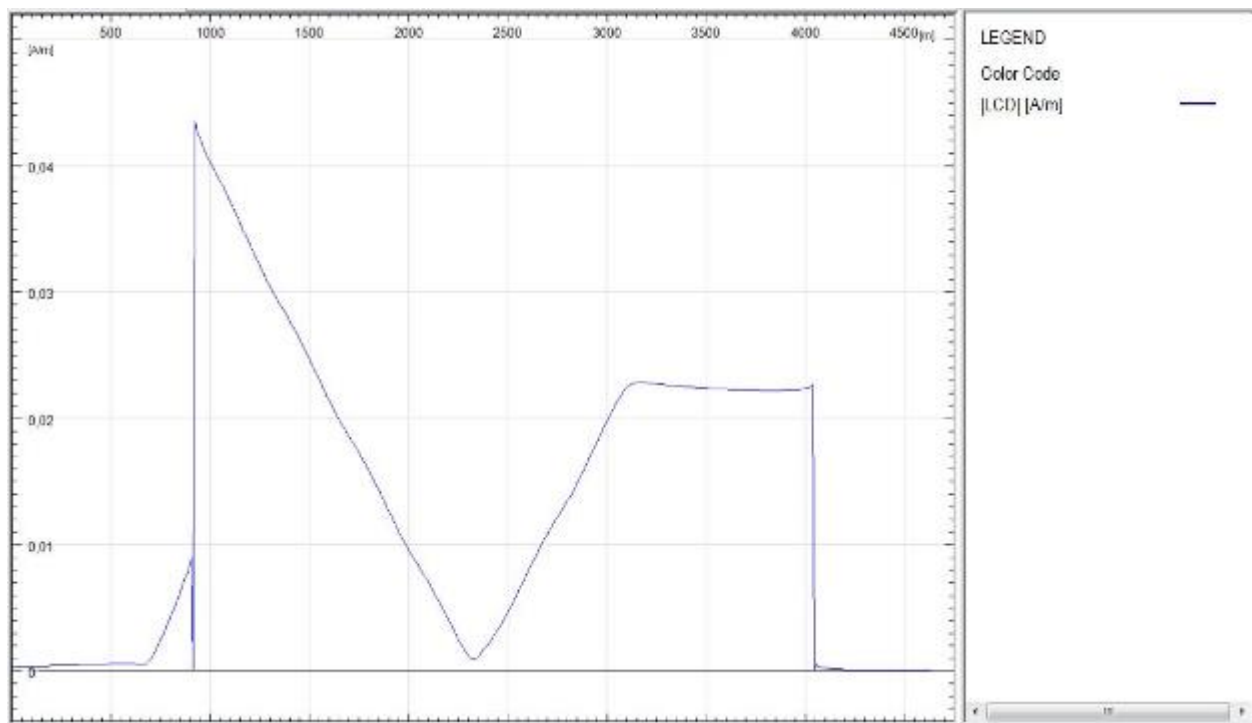
- $I_R = 1500 \text{ A} \angle 0.0 \text{ deg}$
- $I_S = 1500 \text{ A} \angle 120.0 \text{ deg}$
- $I_T = 1500 \text{ A} \angle 240.0 \text{ deg}$

Tablica 5.1. Iznosi napona pojedinih faza

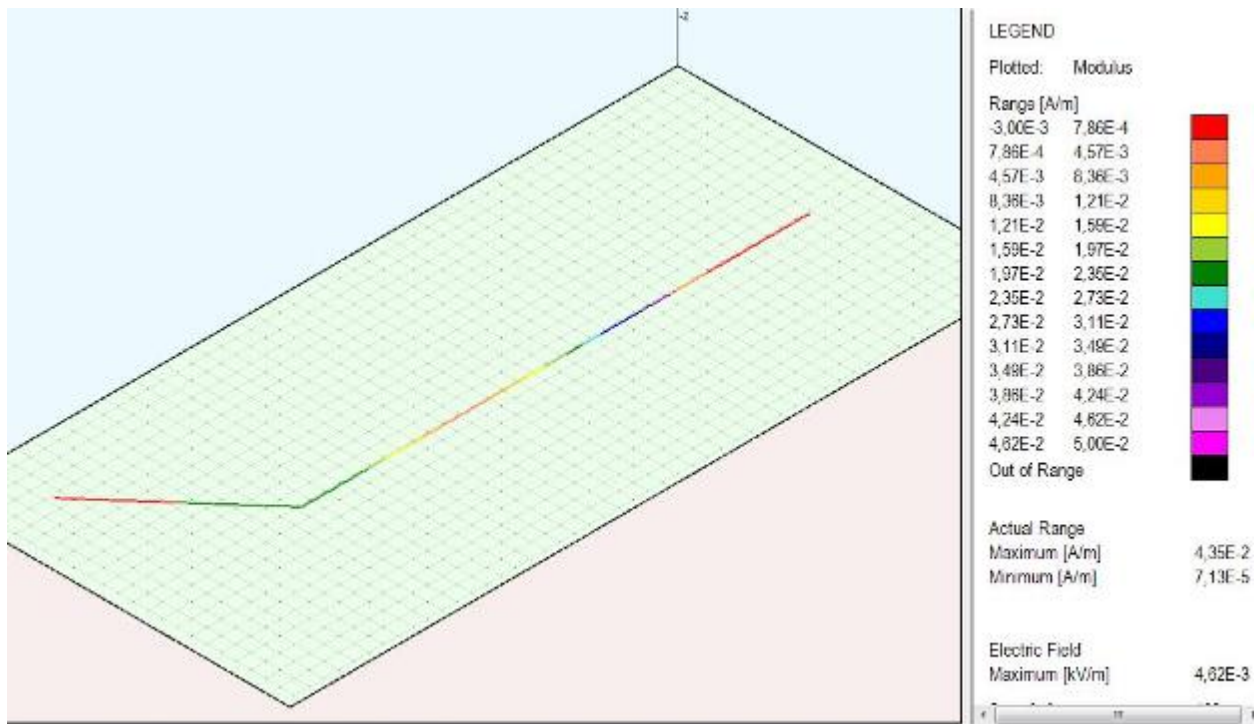
| Dalekovod |                               |                               |
|-----------|-------------------------------|-------------------------------|
| 1.faza    | 2.faza                        | 3.faza                        |
| 400000 V  | $-200000 + j346410 \text{ V}$ | $-200000 - j346410 \text{ V}$ |

Tablica 5.2. Iznosi struja pojedinih faza

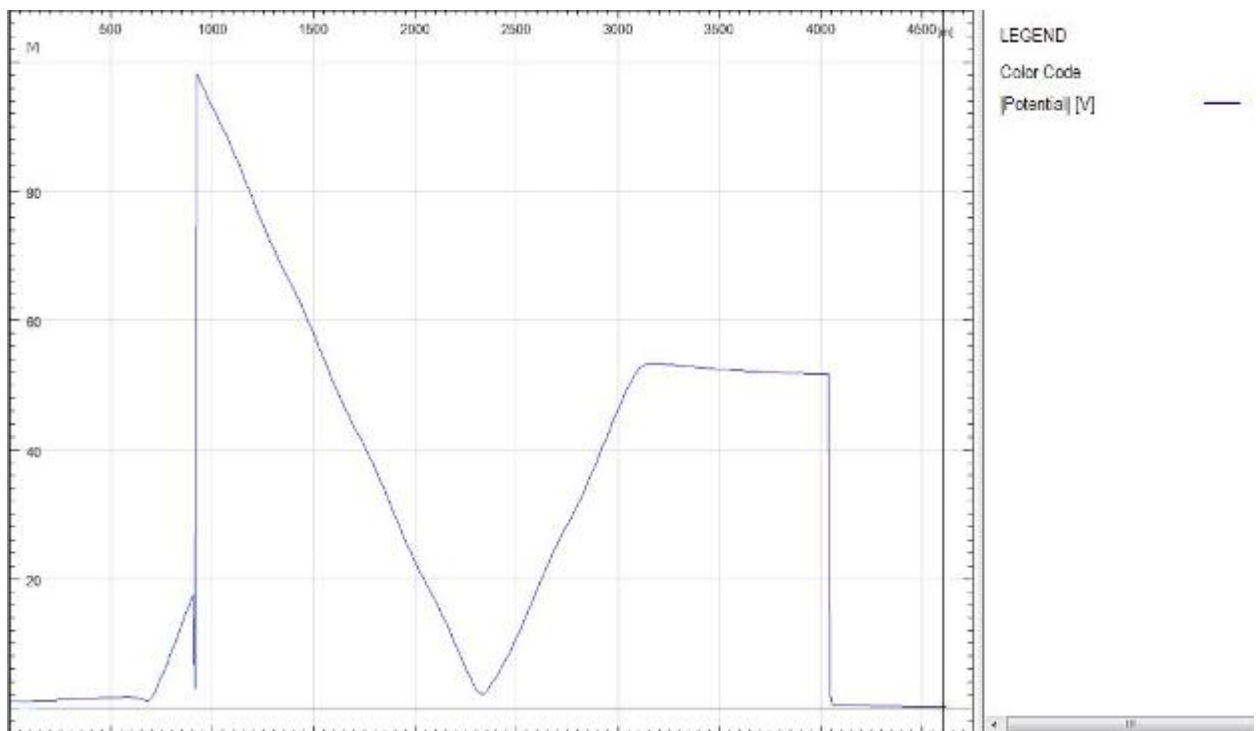
| Dalekovod |                          |                          |
|-----------|--------------------------|--------------------------|
| 1.faza    | 2.faza                   | 3.faza                   |
| 1500 A    | $-750 + j1299 \text{ A}$ | $-750 + j1299 \text{ A}$ |



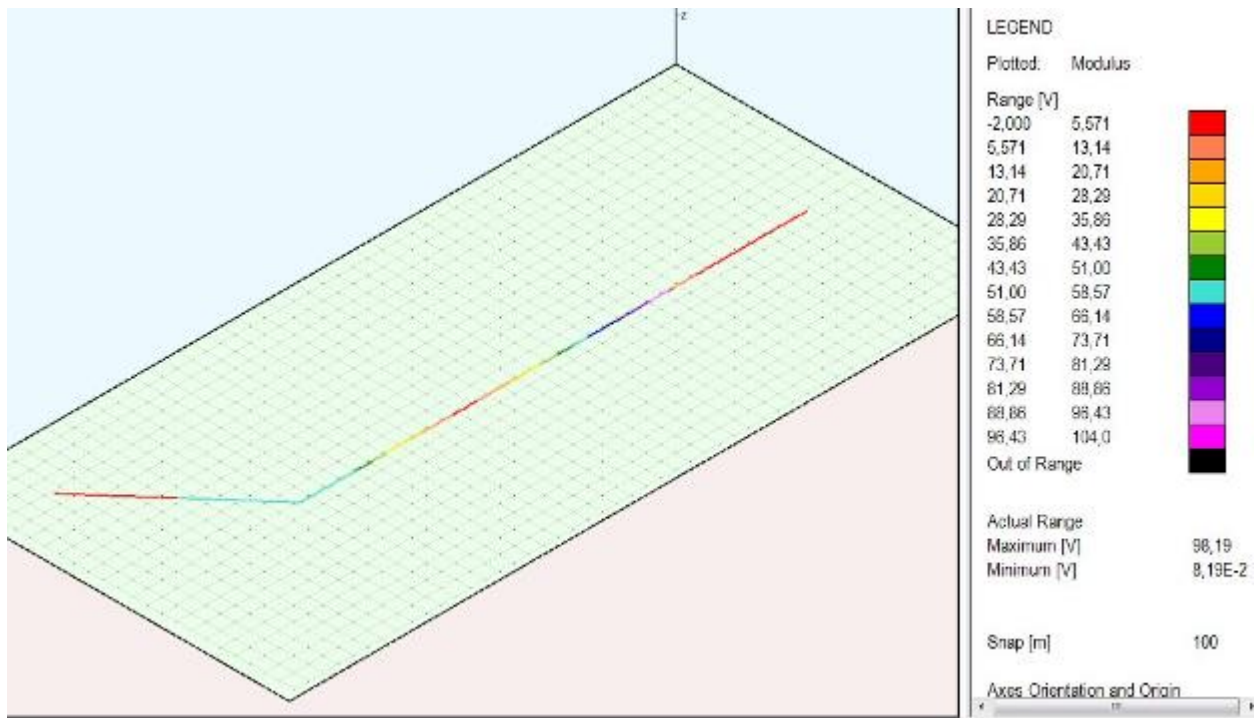
Slika 5.4. Struja propuštanja



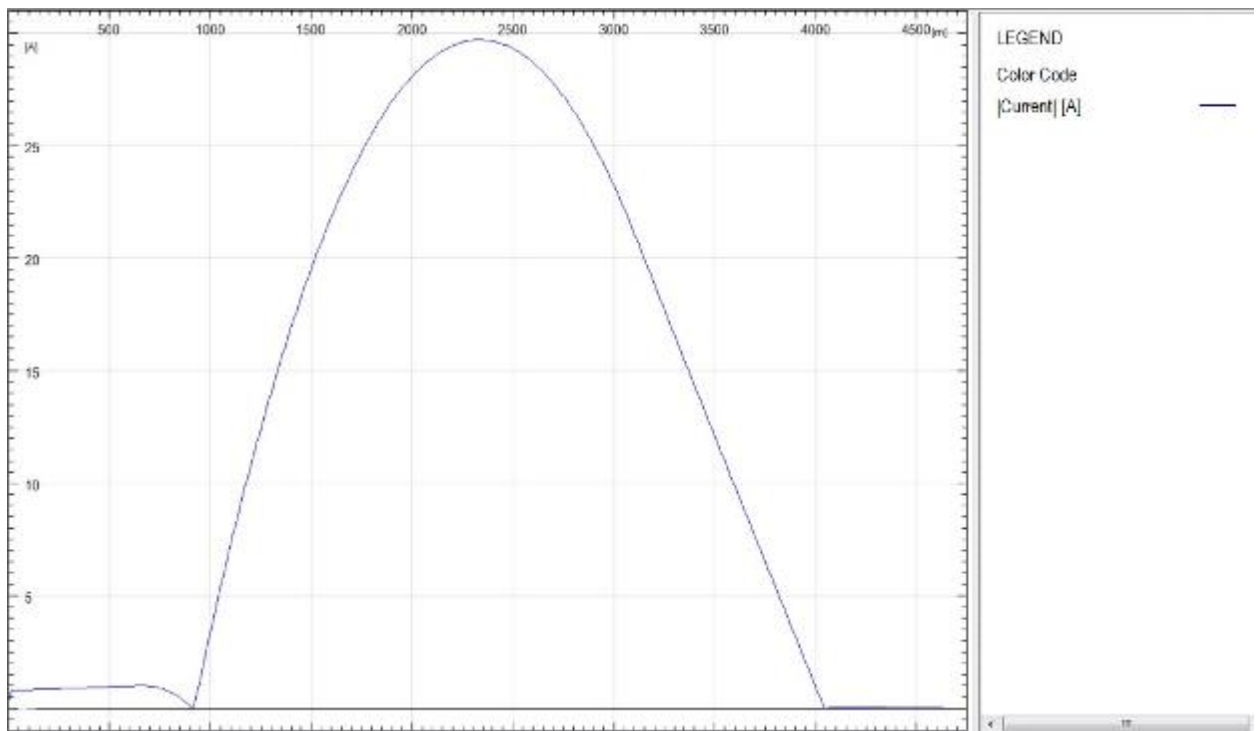
Slika 5.5. Struja propuštanja 3D



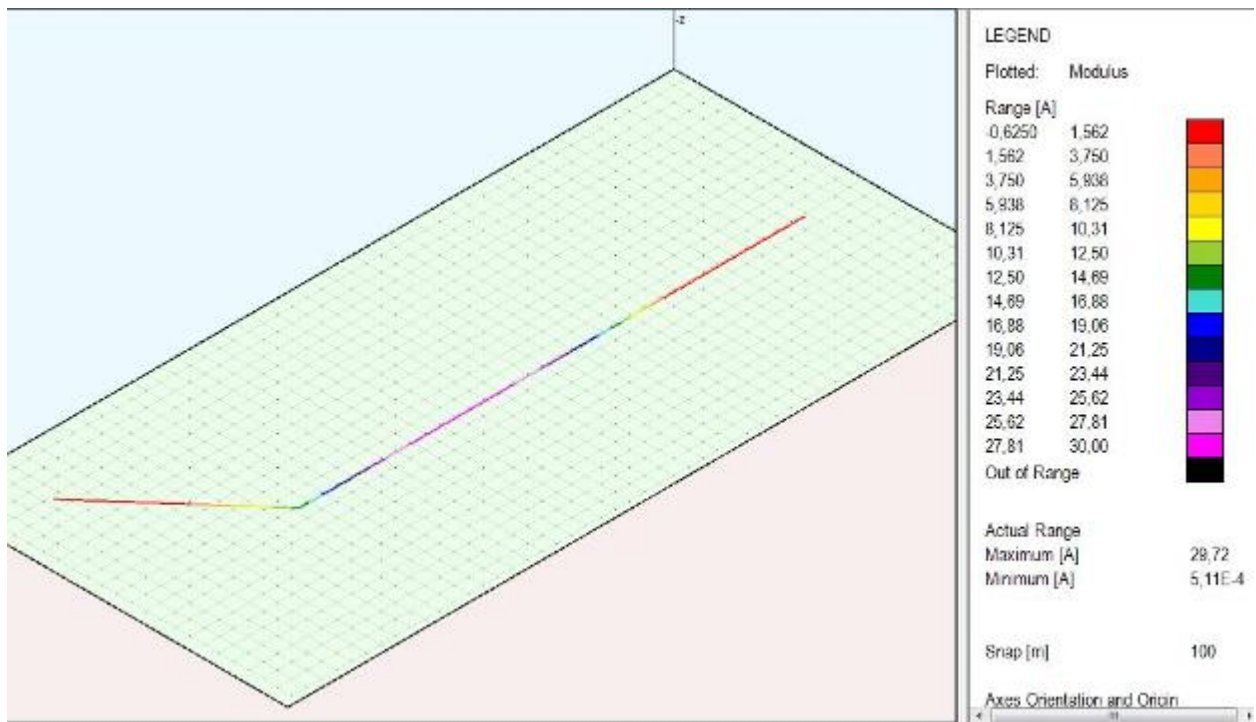
Slika 5.6. Potencijal cjevovoda



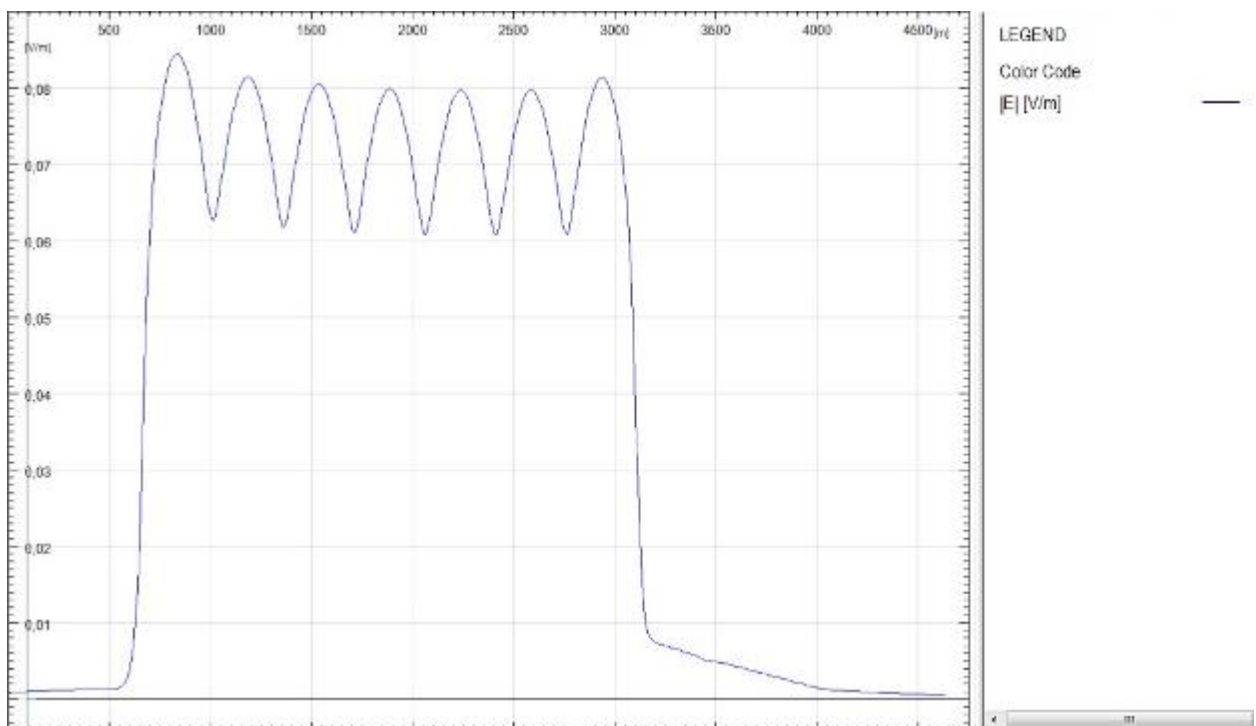
Slika 5.7. Potencijal cjevovoda 3D



Slika 5.8. Uzdužna struja cjevovoda

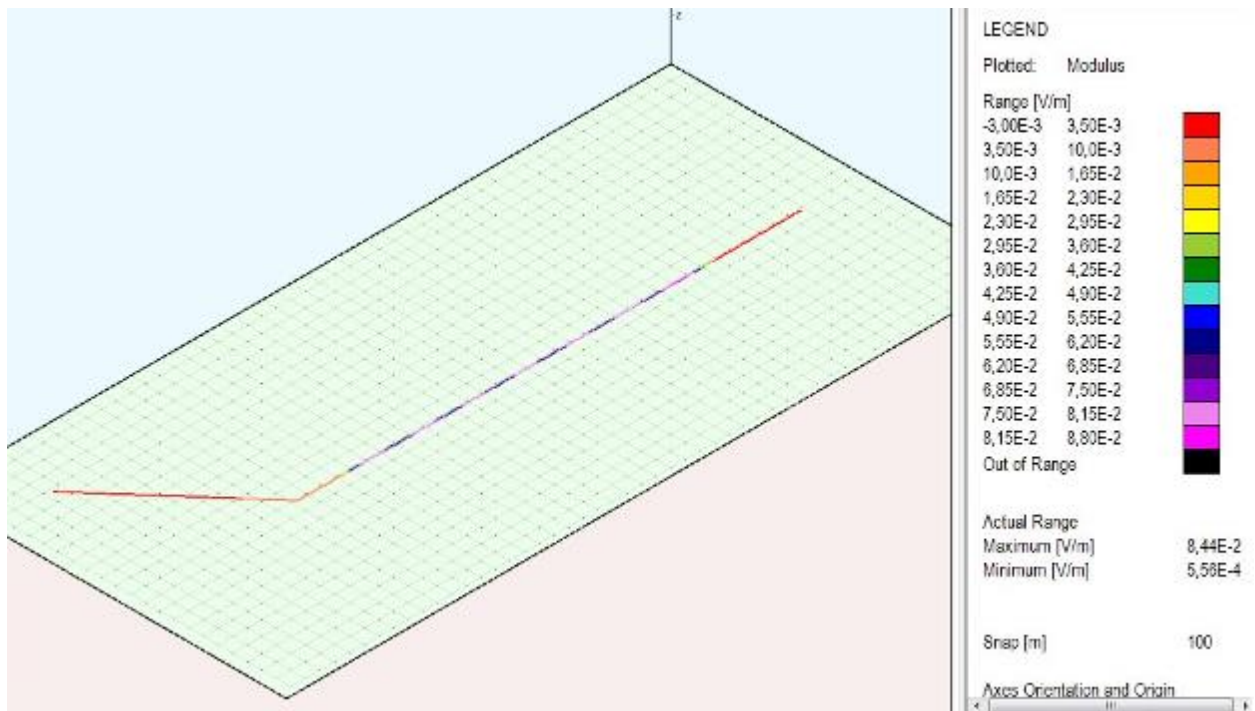


Slika 5.9. Uzdužna struja cjevovoda 3D

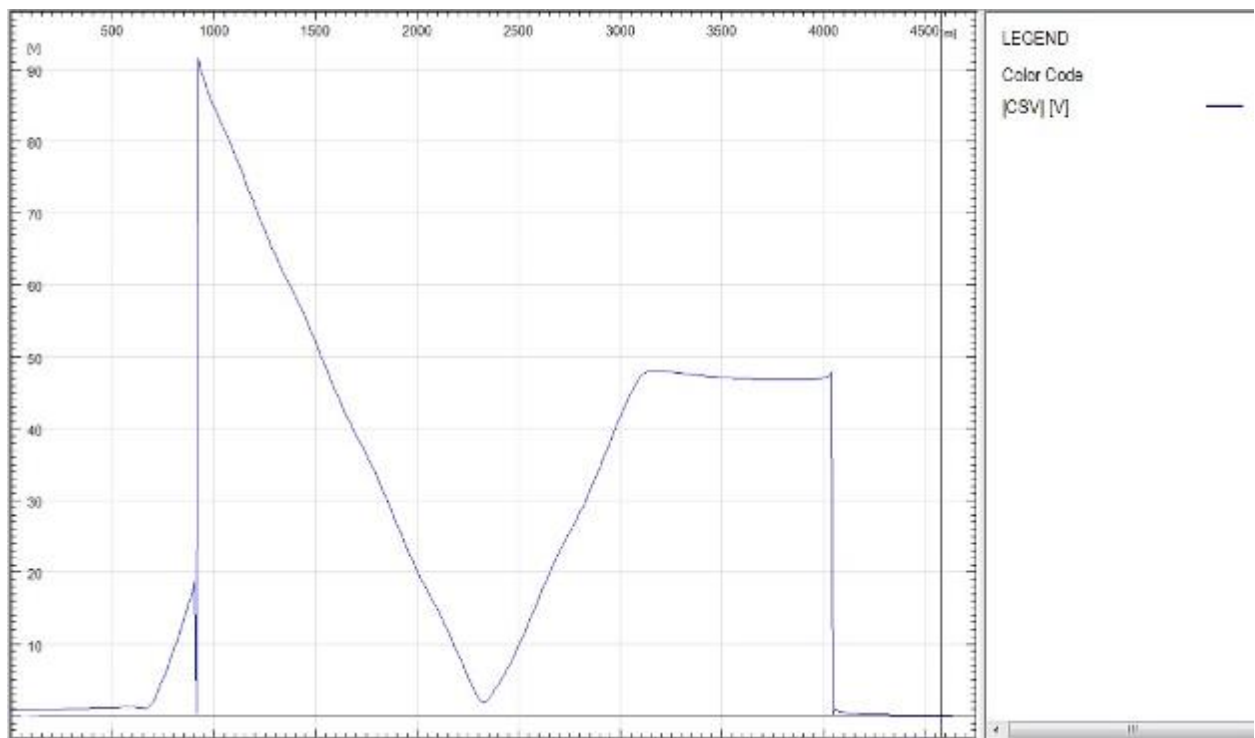


Slika 5.10. Inducirana elektromotorna sila koja djeluje na cjevovod

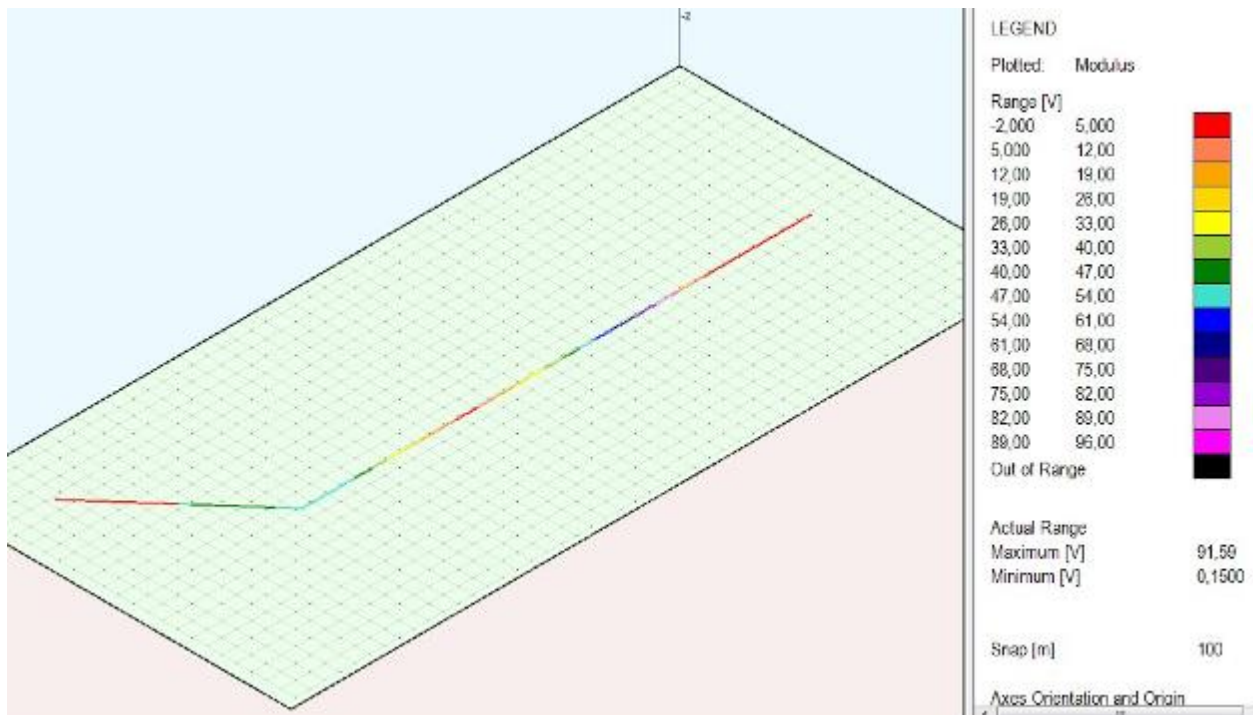




Slika 5.11. Inducirana elektromotorna sila koja djeluje na cjevovod 3D



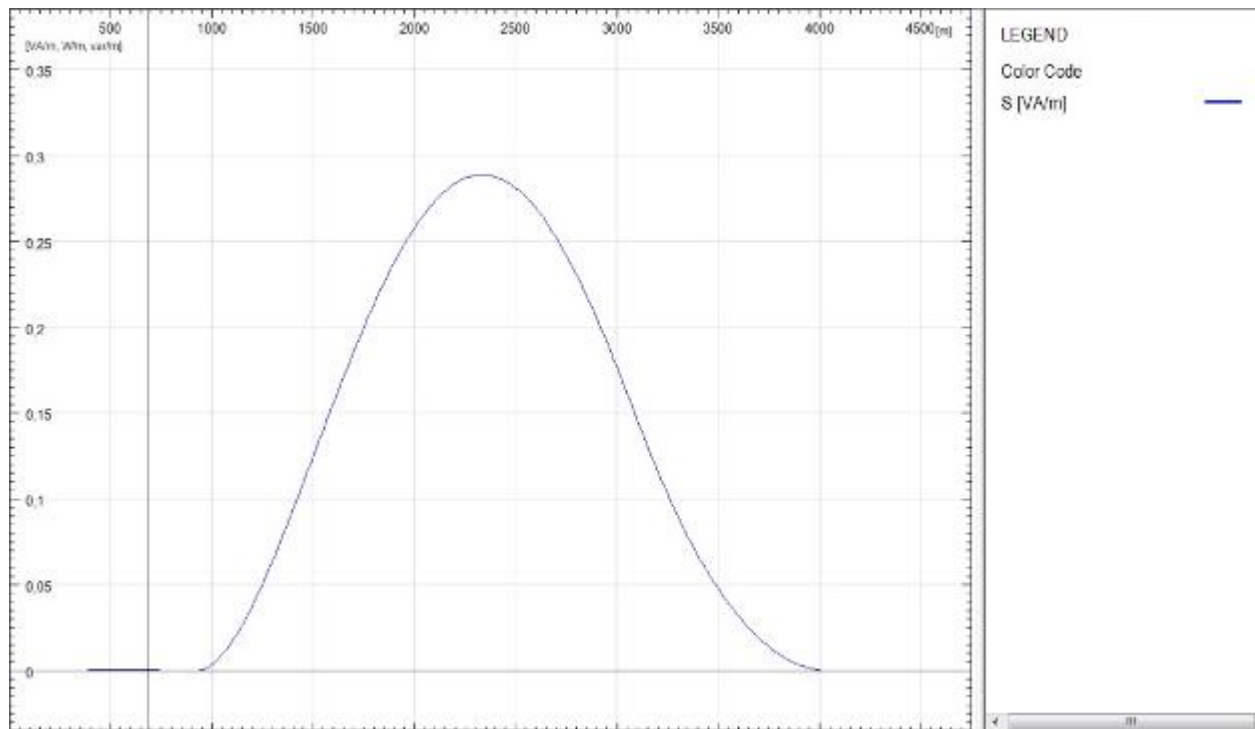
Slika 5.12. Potencijal na premazu cjevovoda



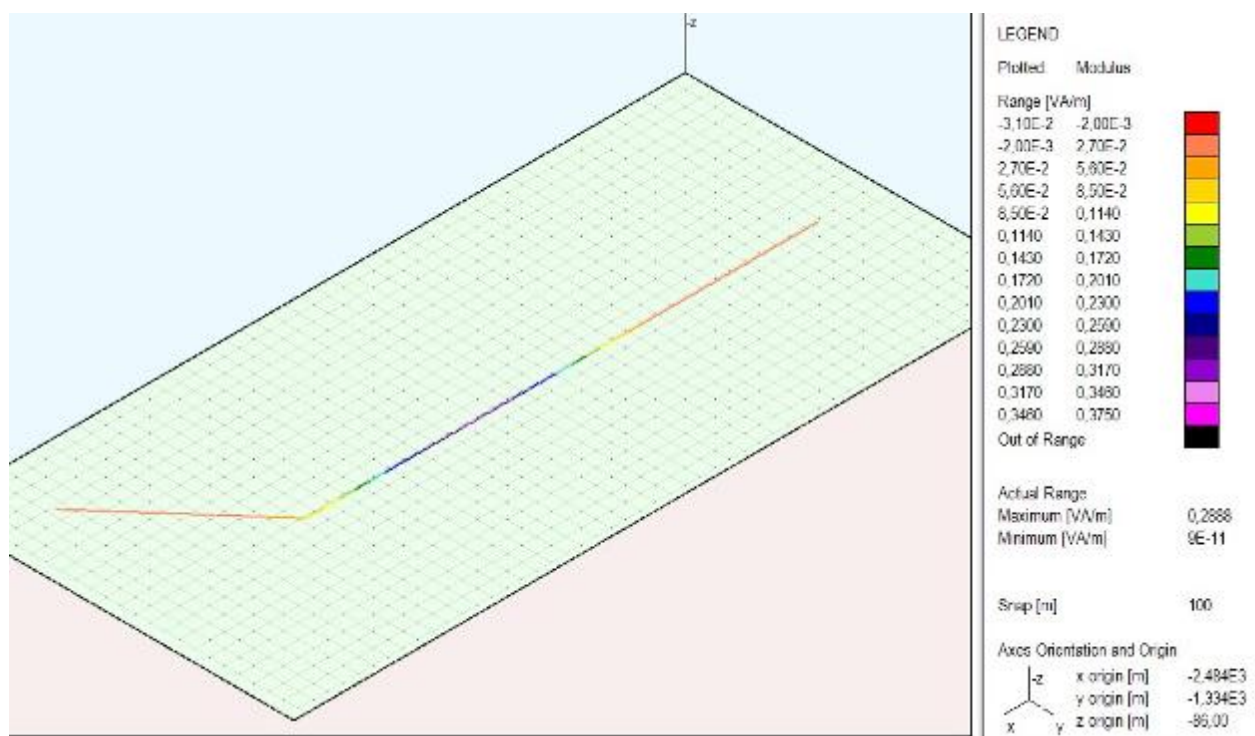
Slika 5.13. Potencijal na premazu cjevovoda 3D

Iz prethodnih slika je vidljivo da se najveći potencijal cjevovoda javlja na krajevima paralelnog pružanja cjevovoda i dalekovoda i njegova maksimalna vrijednost je 98,19 V. Razlog tome su jake diskontinuirane elektromotorne sile na tim krajevima koje stvaraju veliko protjecanje struje iz cjevovoda. Minimalni potencijal nalazi se na sredini cjevovoda zbog toga što je inducirana elektromotorna sila s obje strane ove točke ista. Rezultat tome je i minimalno protjecanje struje na tom području. Na krajevima paralelnog pružanja nalazi se i maksimalni potencijal na premazu cjevovoda te je jednako maksimalno induciranom naponu. Maksimalna vrijednost uzdužne struje nalazi se na sredini cjevovoda i iznosi 29,72 A, dok njena vrijednost slabi na krajevima paralelnog pružanja dalekovoda i cjevovoda.

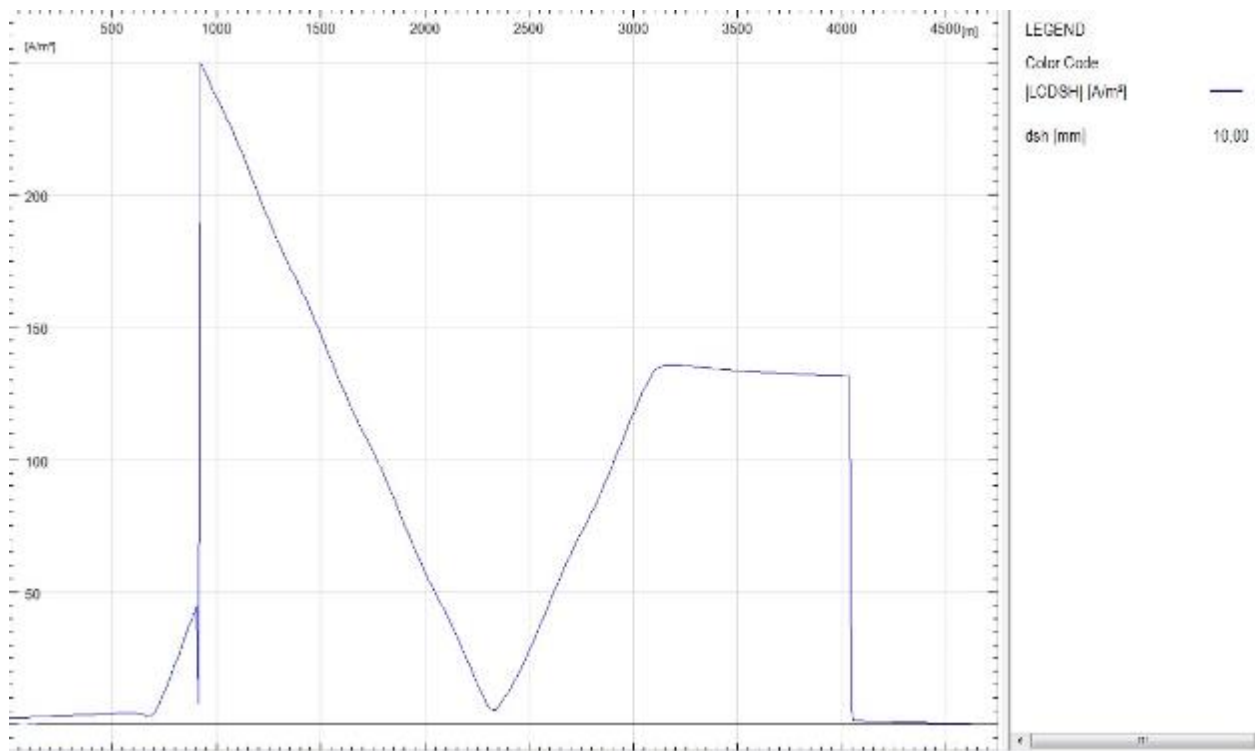




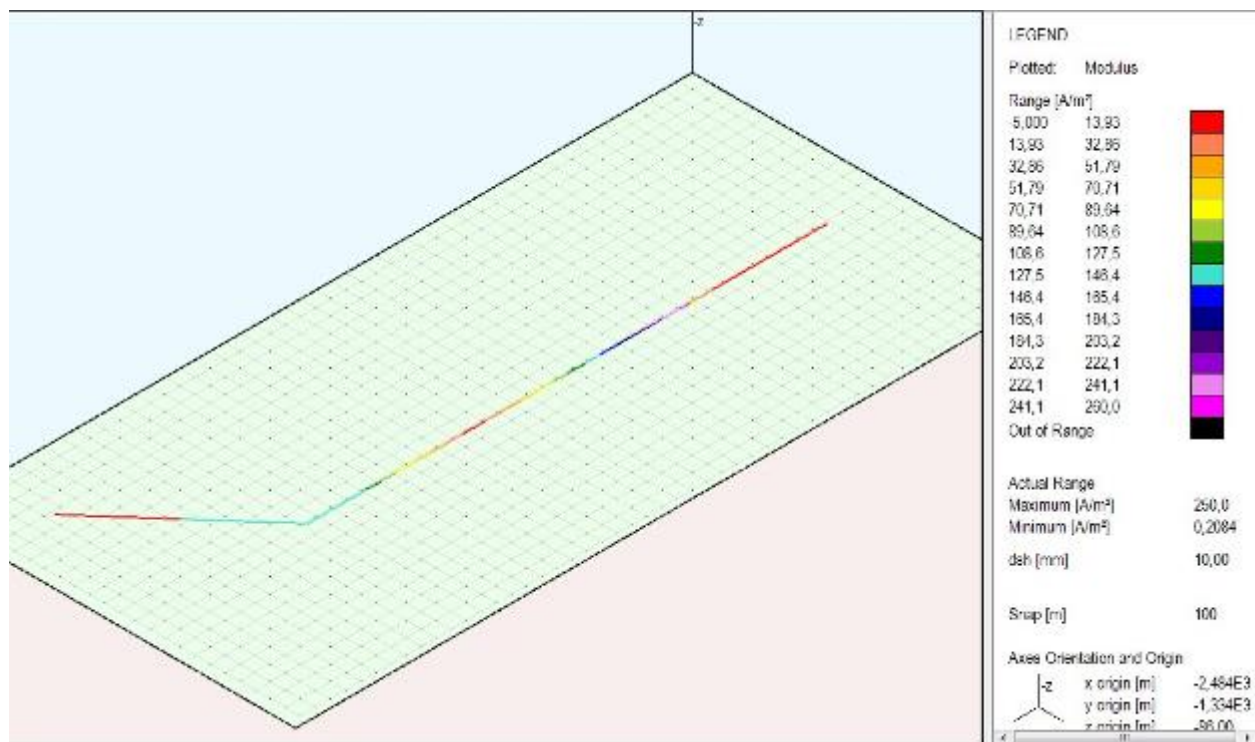
Slika 5.14. Disipirana snaga na cjevovodu



Slika 5.15. Disipirana snaga na cjevovodu 3D

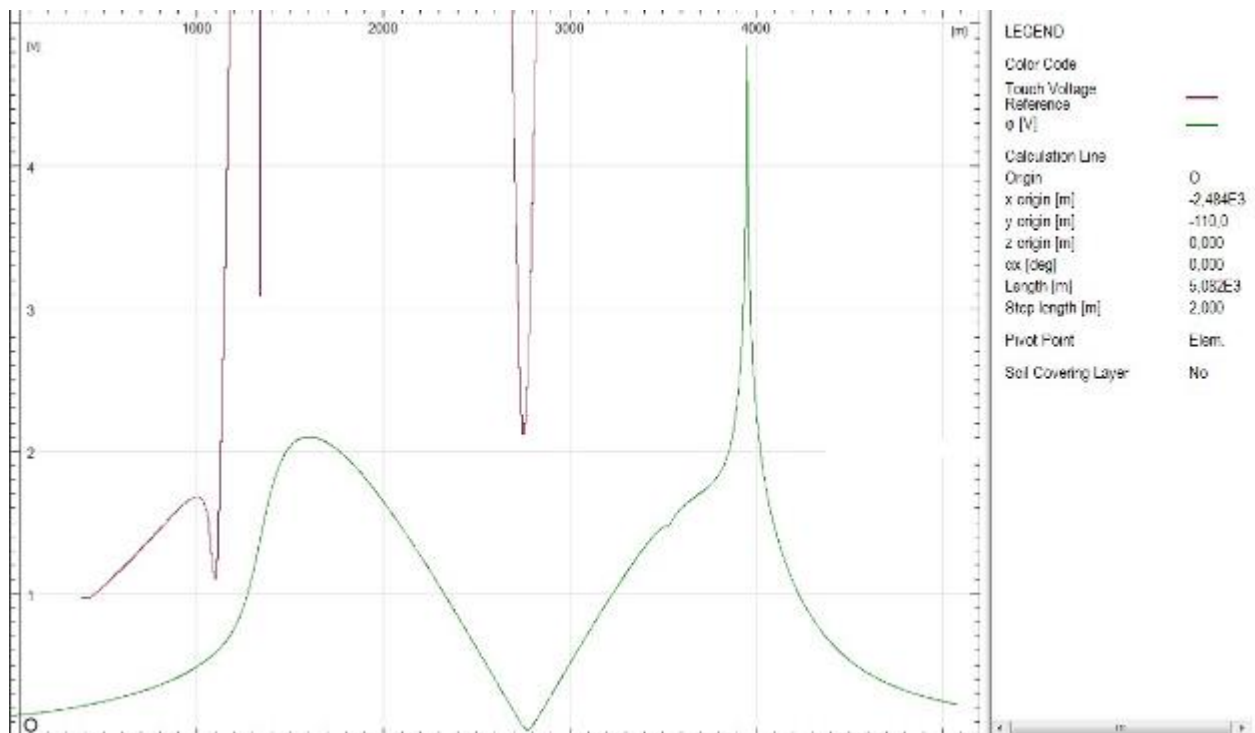


Slika 5.16. Struja propuštanja na malim oštećenjima premaza (engl. *small holidays*)

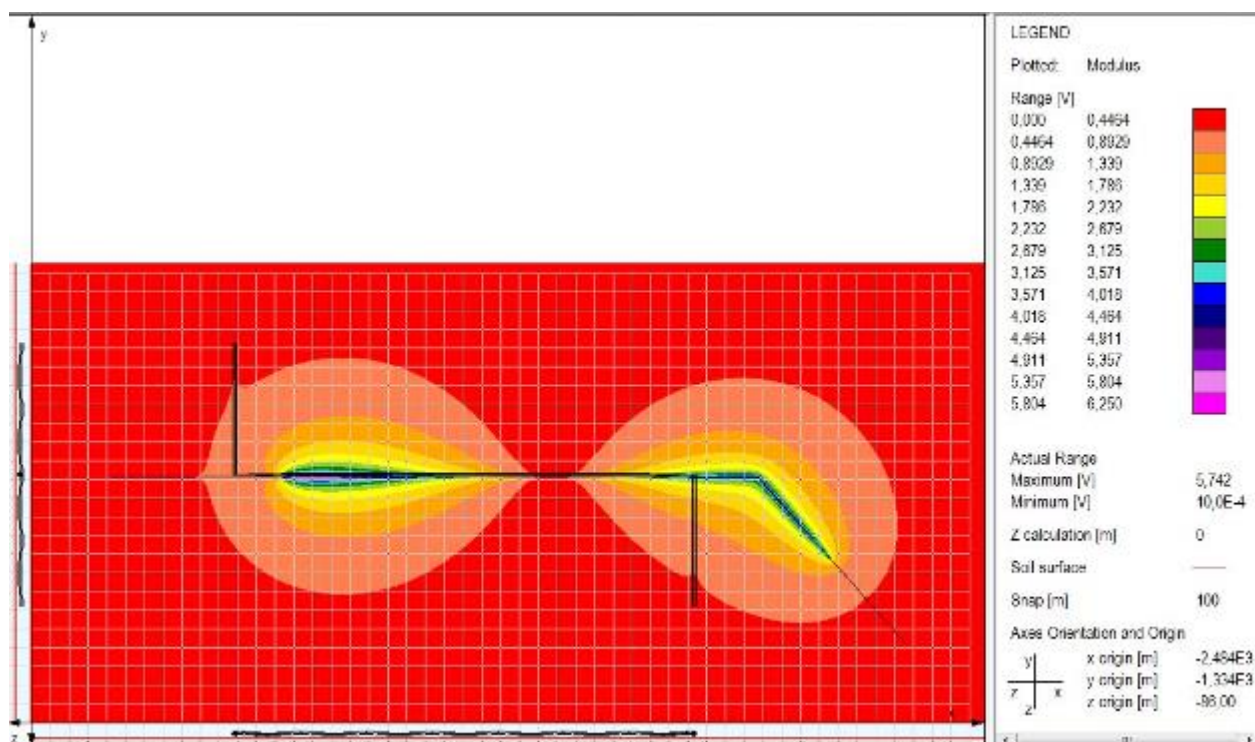


Slika 5.17. Struja propuštanja na malim oštećenjima premaza 3D

Kao i u slučaju vrijednosti uzdužne struje, maksimalna vrijednost kompleksne snage nalazi se na sredini cjevovoda dok se na krajevima paralelnog pružanja smanjuje. Struja propuštanja na malim oštećenjima premaza (engl. *small holidays*) najveća je na krajevima paralelnog pružanja cjevovoda i njena maksimalna gustoća iznosi  $250 \text{ A/m}^2$ .

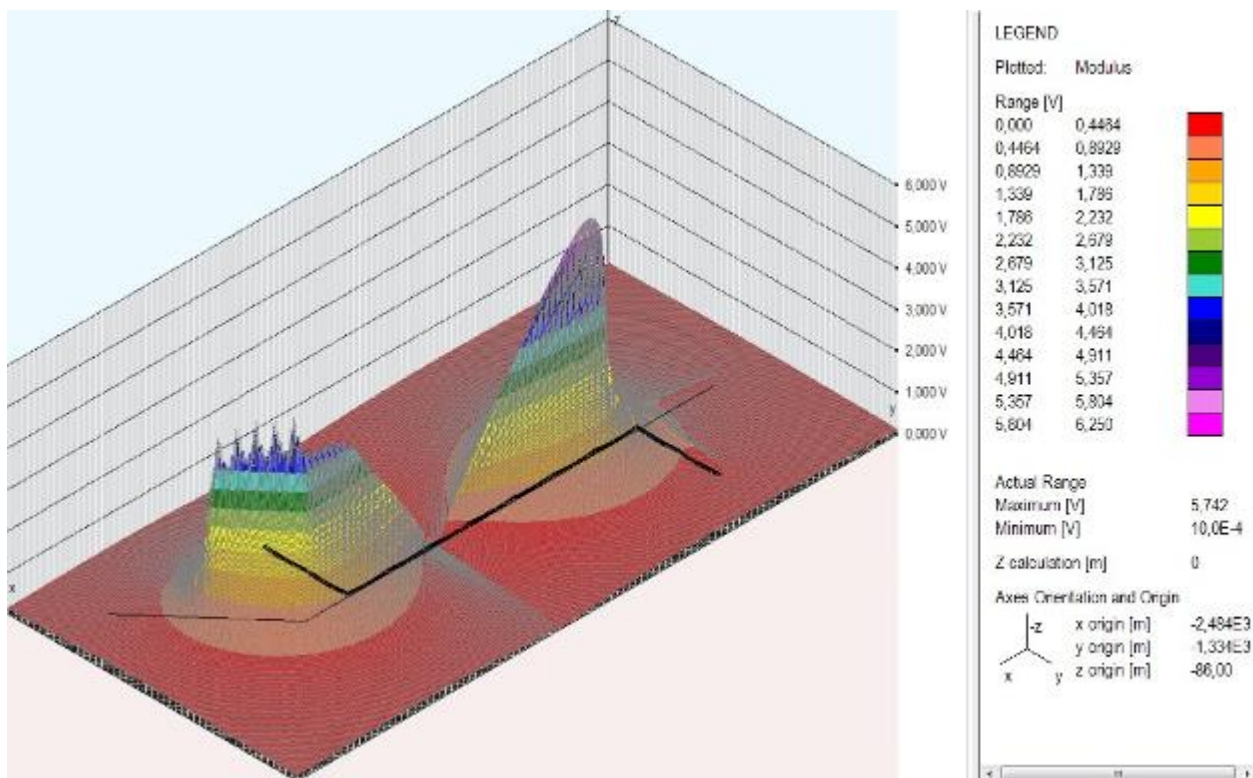


Slika 5.18. Napón dodira



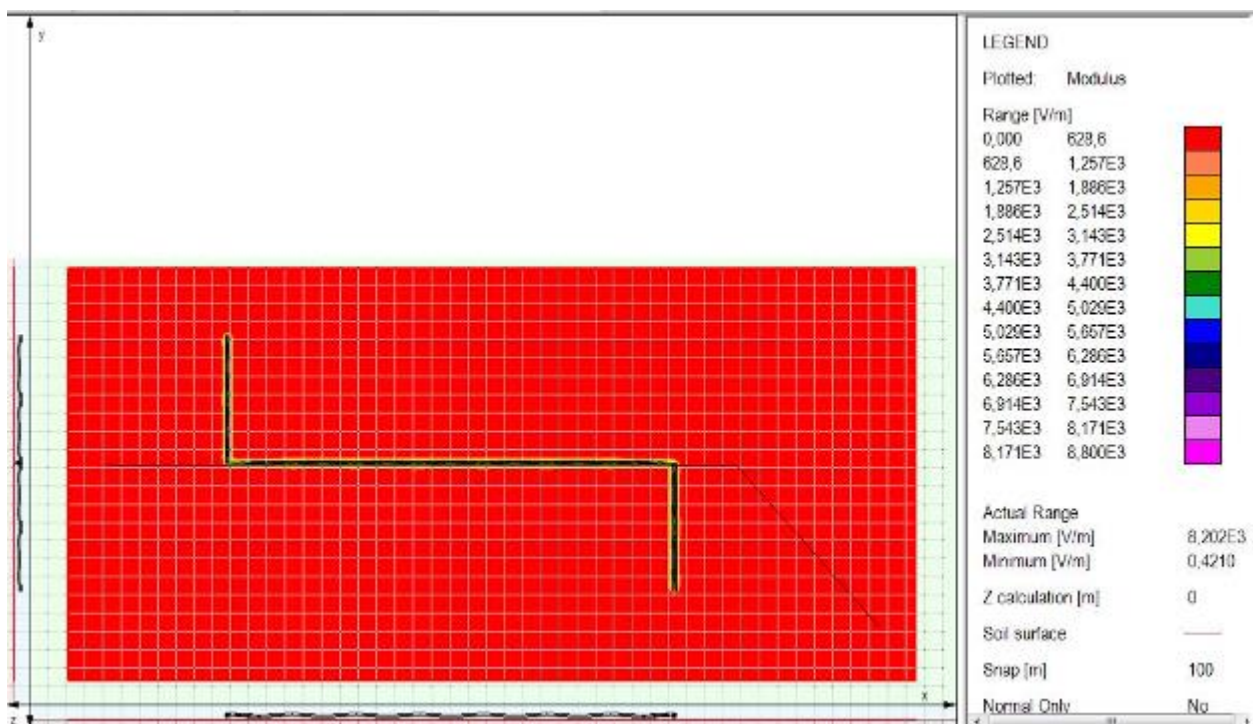
Slika 5.19. Napón dodira 2D prikaz



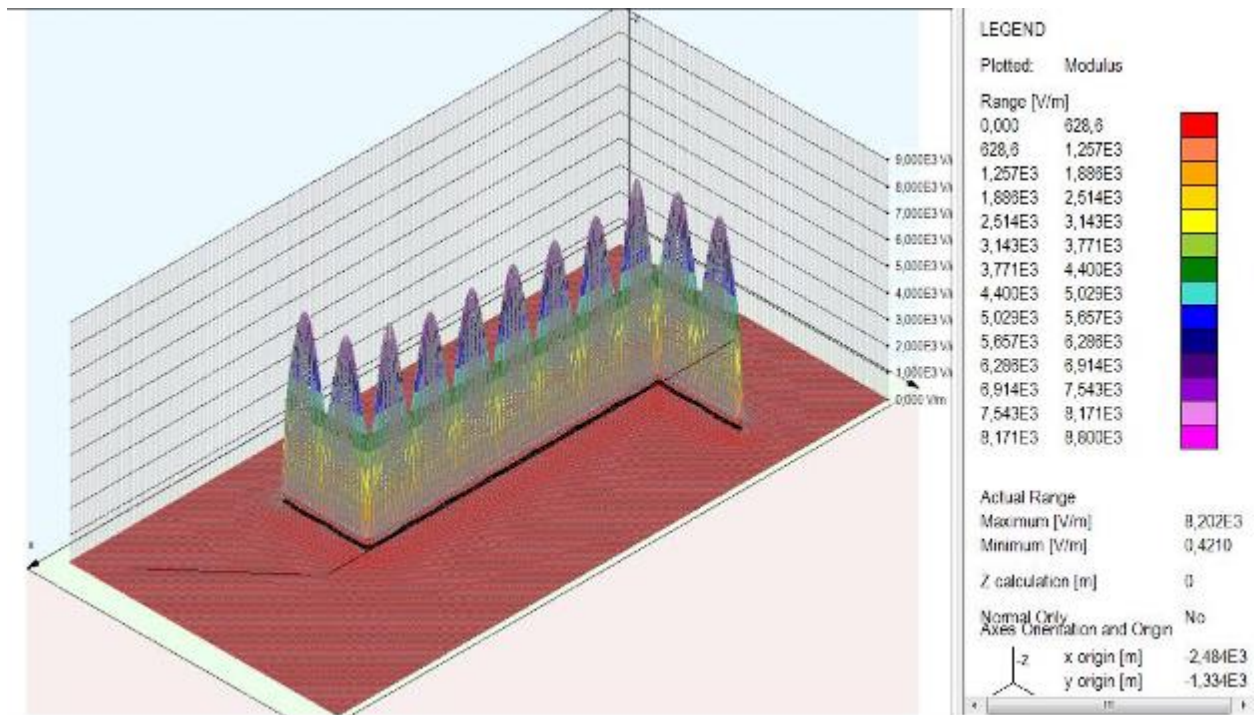


Slika 5.20. Napon dodira 3D prikaz

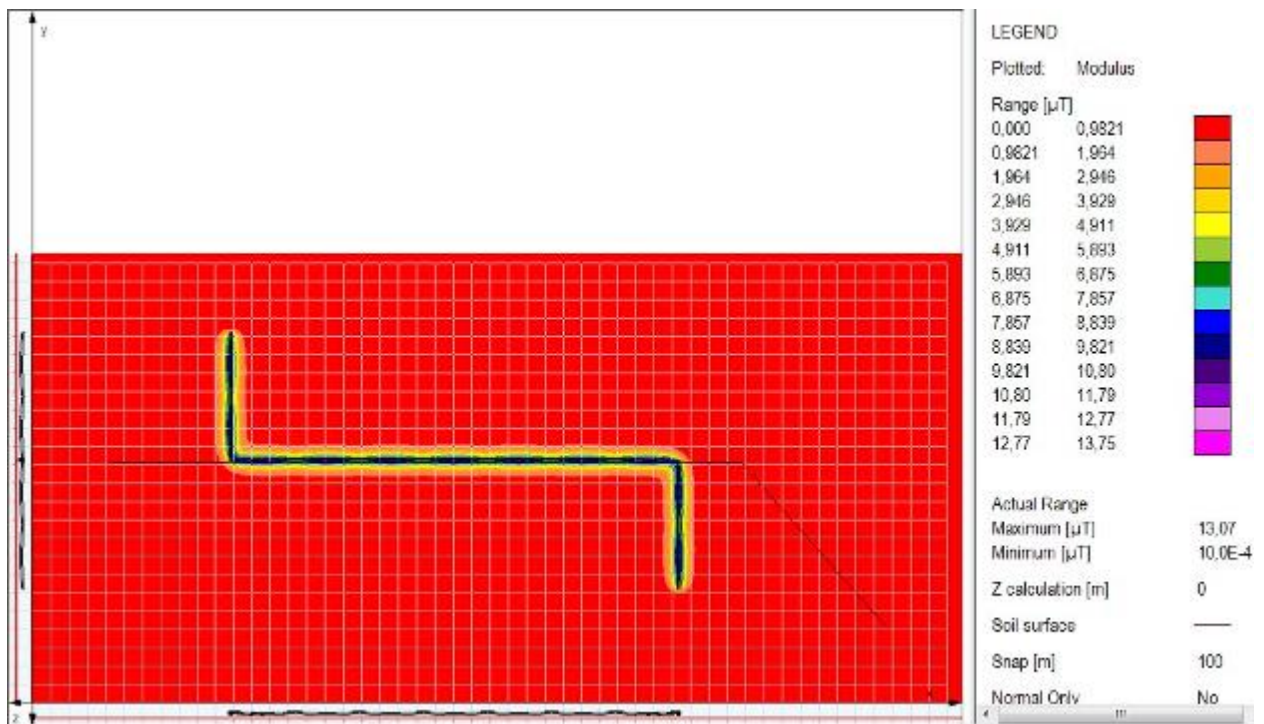
Iz prethodnih slika vidljivo je da je napon dodira najveći na krajevima cjevovoda i iznosi 5,74 V dok je na sredini cjevovoda vrlo nizak.



Slika 5.21. Jakost električnog polja na površini tla

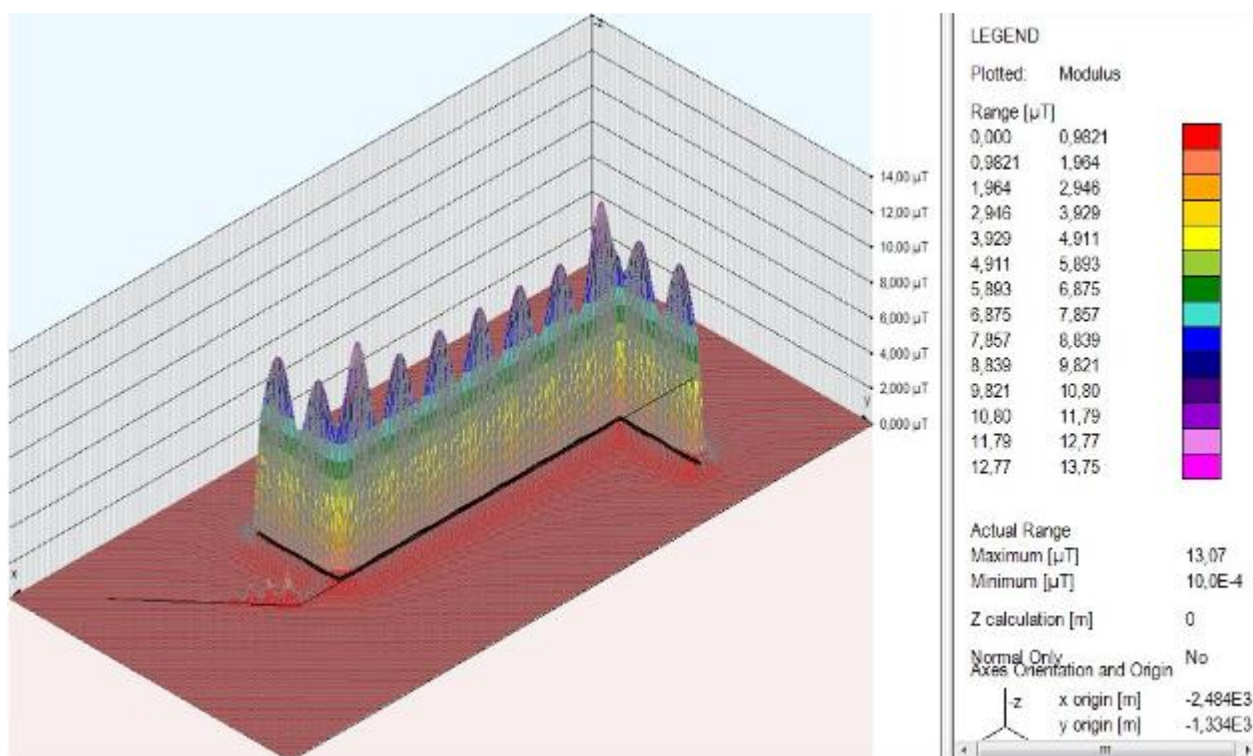


Slika 5.22. Raspodjela električnog polja koje djeluje pri površini tla 3D



Slika 5.23. Raspodjela magnetskog polja duž cjevovoda pri površini tla





Slika 5.24. Raspodjela magnetskog polja pri površini tla 3D

Iz prethodnih slika vidljivo je da se električno polje na površini tla pojavljuje cijelom dužinom trase dalekovoda, a najveće je na središnjem dijelu raspona između stupa dalekovoda zbog toga što je uslijed provjesa na tom dijelu vodič najbliži površini tla. Njegova maksimalna vrijednost iznosi oko 8200 V/m. Identični slučaj je i za magnetsko polje, dok njegova maksimalna vrijednost iznosi otprilike 13,07 μT.

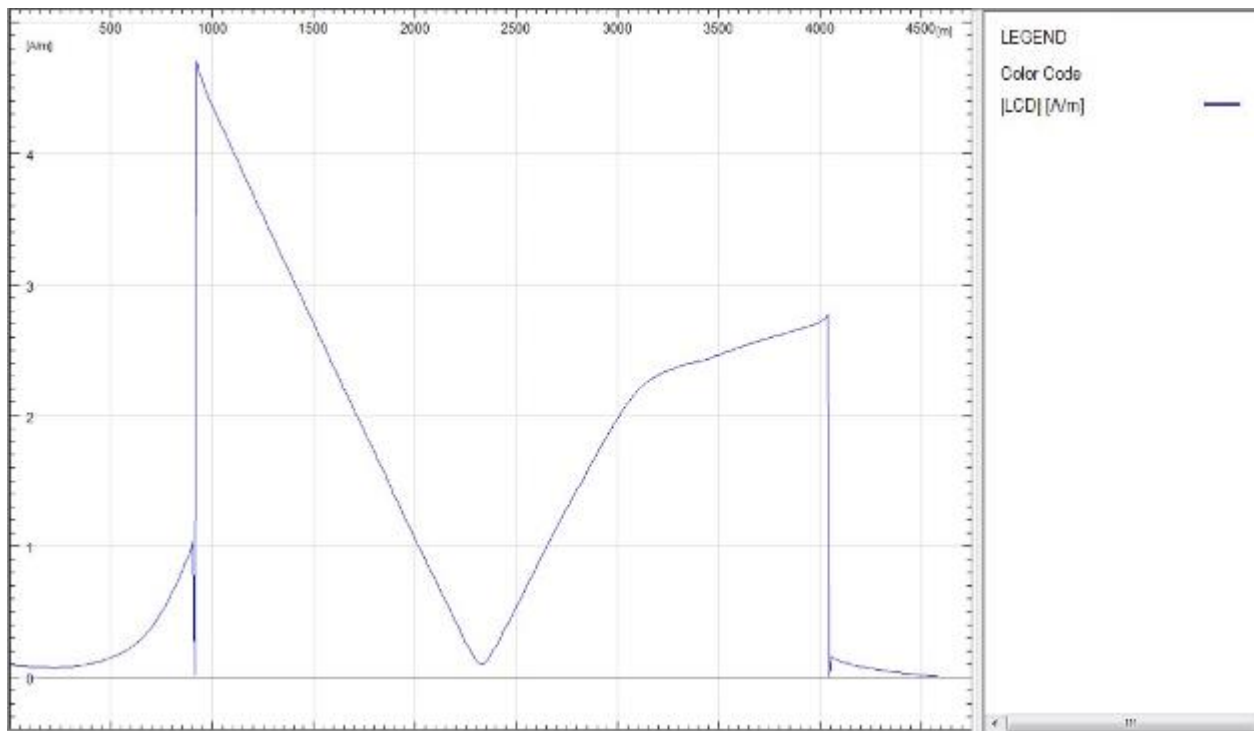
### 5.3. Analiza u slučaju kvara dalekovoda

Za slučaj kvara prikazan je jednofazni kratki spoj i to za fazni vodič koji je najbliži cjevovodu. Vrijednost napona je ostala ista dok je struja kvara iznosila 20000 A.

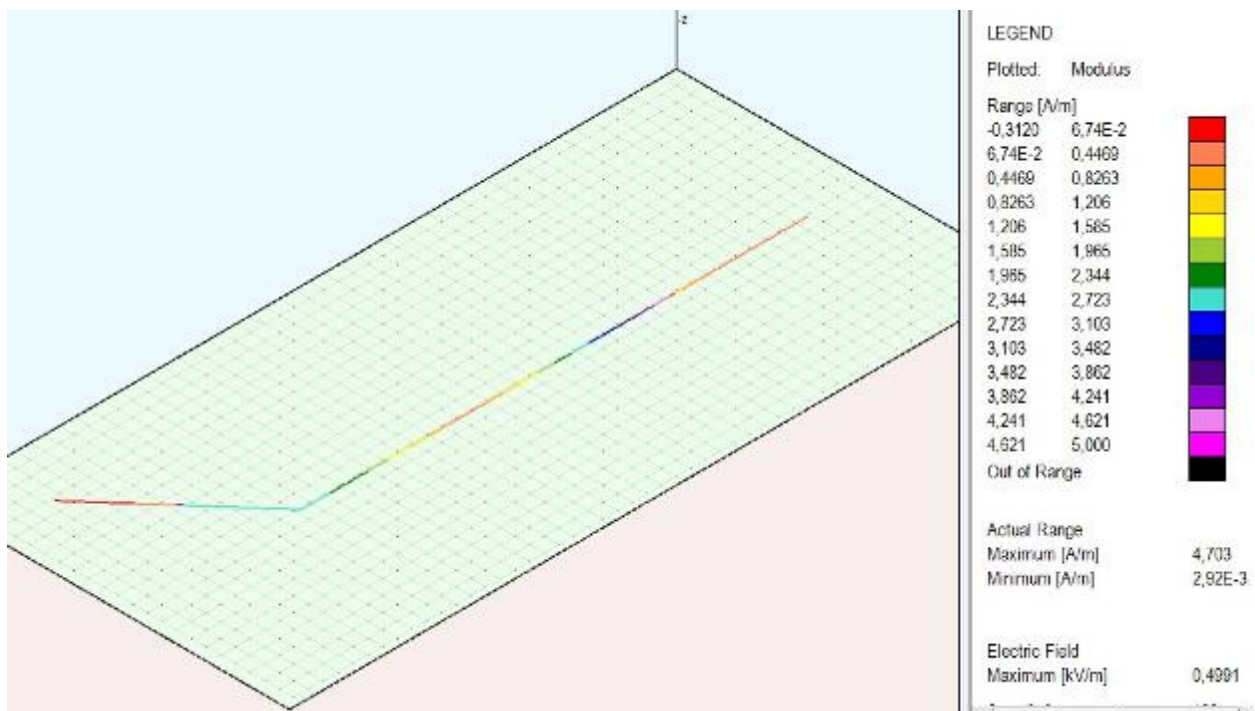
- $I_R = 20000 \text{ A} \perp 0.0 \text{ deg}$
- $I_S = 0 \text{ A} \perp 120.0 \text{ deg}$
- $I_T = 0 \text{ A} \perp 240.0 \text{ deg}$

Tablica 5.3. Iznosi struja pojedinih faza u slučaju kratkog spoja

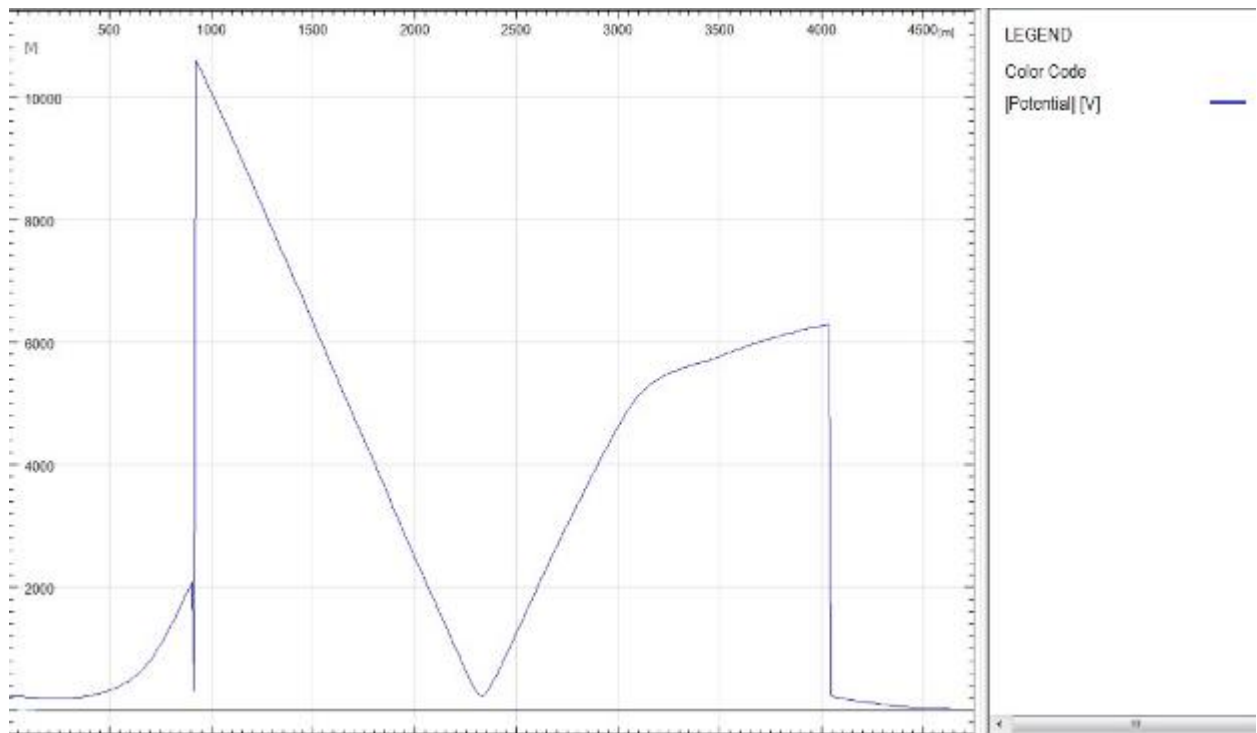
| Dalekovod |        |        |
|-----------|--------|--------|
| 1.faza    | 2.faza | 3.faza |
| 20000 A   | 0 A    | 0 A    |



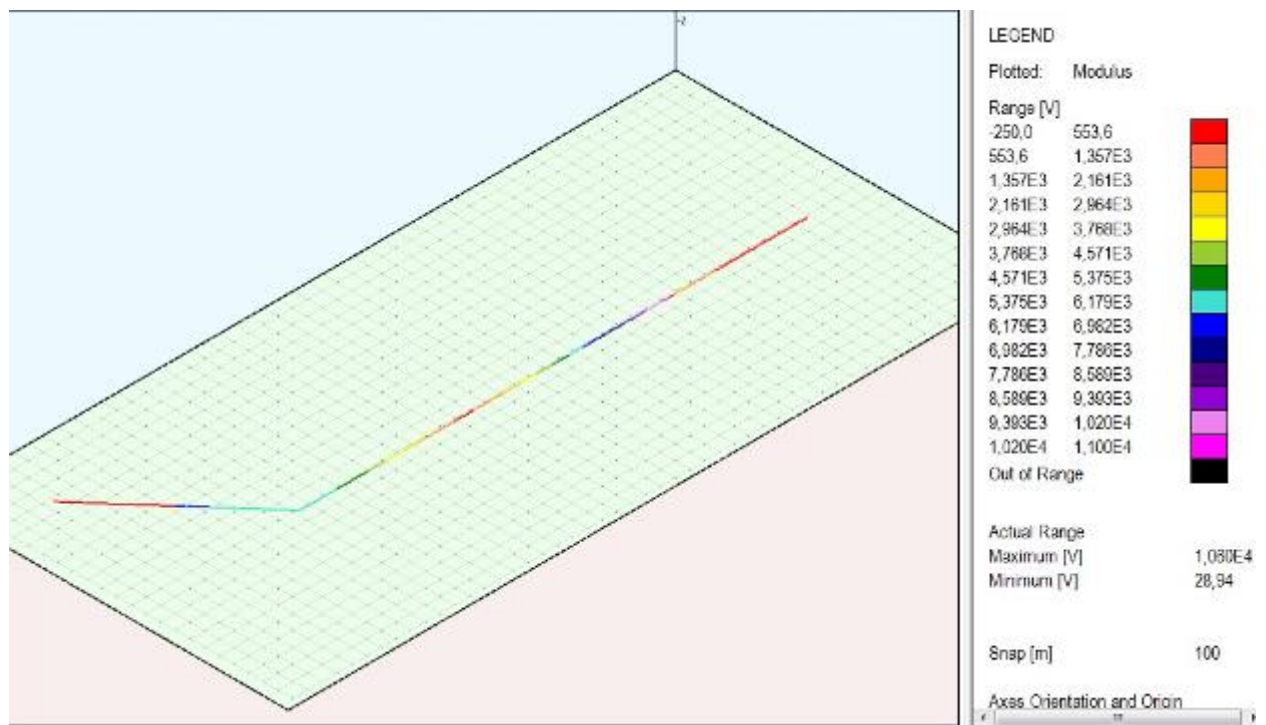
Slika 5.25. Struja propuštanja



Slika 5.26. Struja proštanja 3D

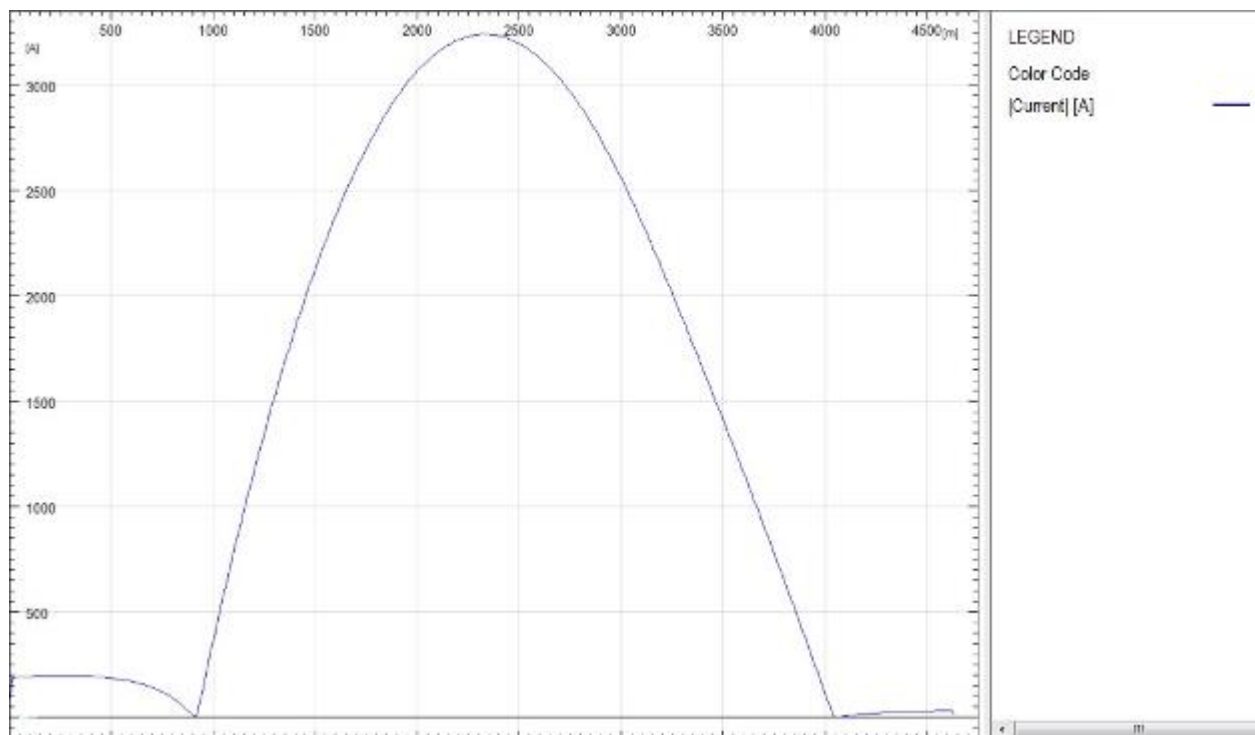


Slika 5.27. Potencijal cjevovoda

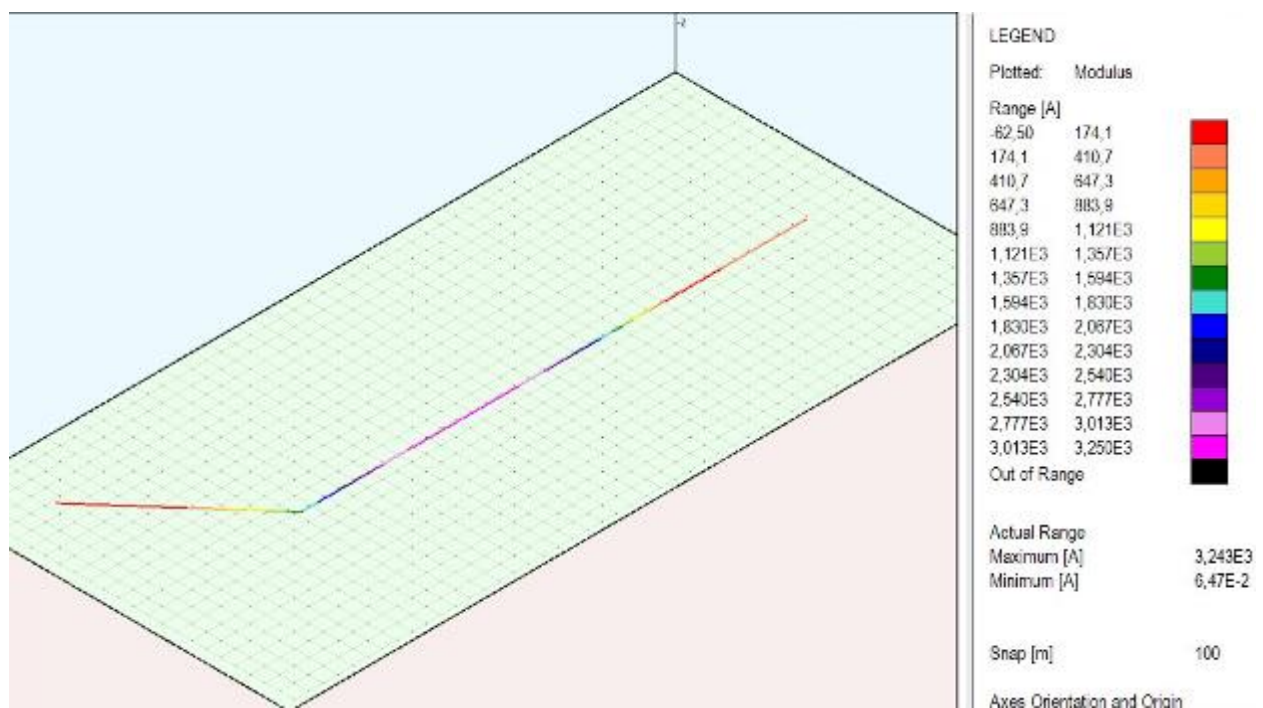


Slika 5.28. Potencijal cjevovoda 3D





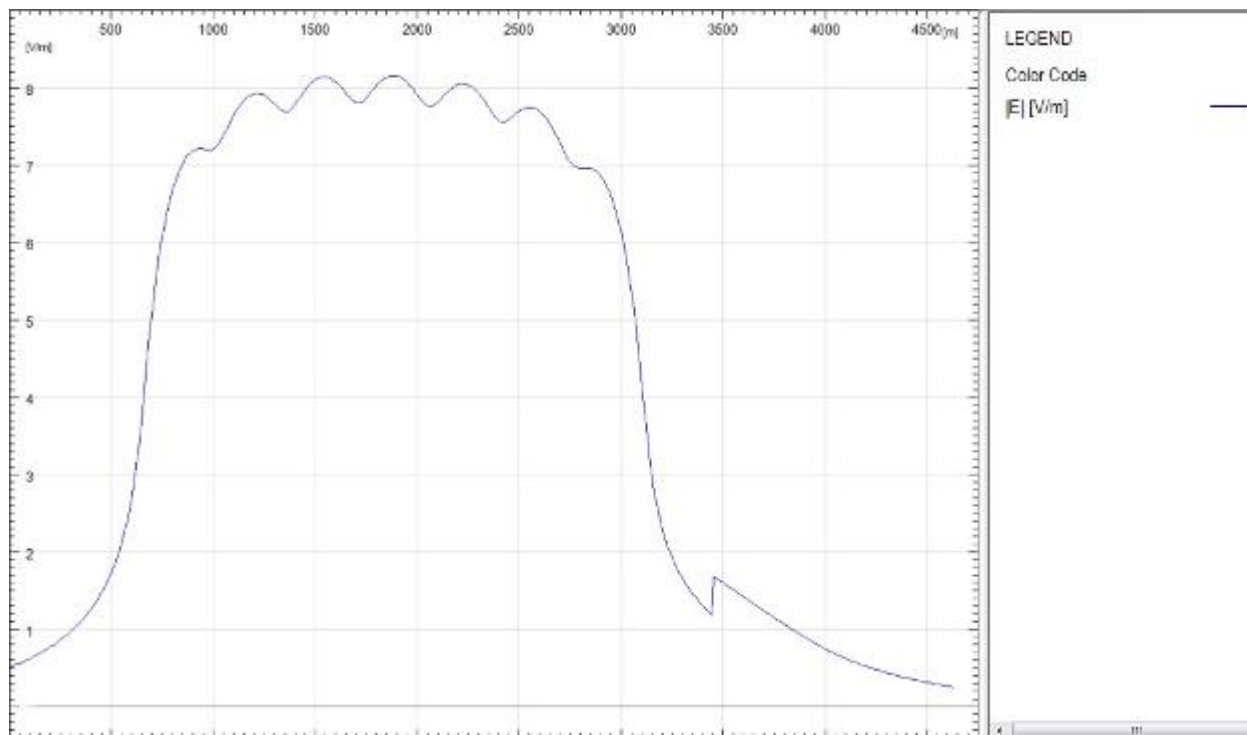
Slika 5.29. Uzdužna struja cjevovoda



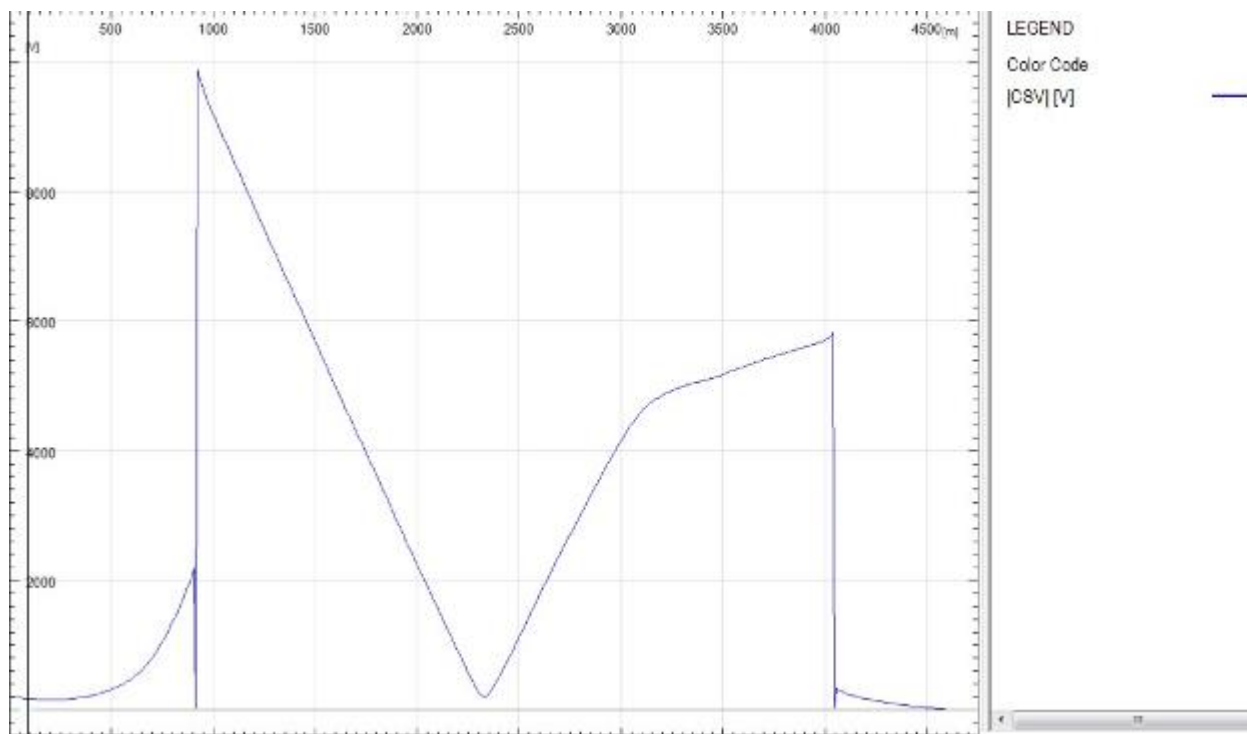
Slika 5.30. Uzdužna struja cjevovoda 3D

Iz prethodnih slika je vidljiv velik porast potencijala te struje propuštanja na krajevima cjevovoda u slučaju kvara. Maksimalna vrijednost potencijala iznosi nešto više od 10 000 V, a struje propuštanja nešto manje od 5 A/m. Kao i u slučaju normalnih uvjeta rada, struja cjevovoda ima

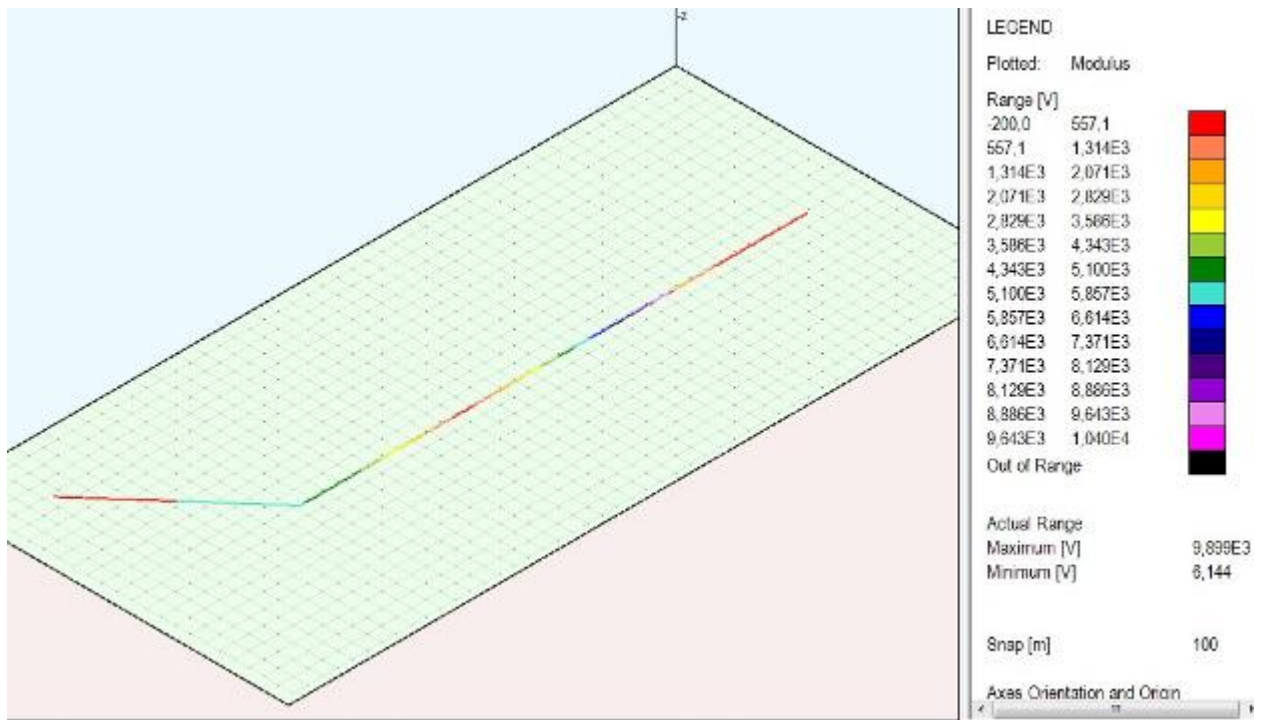
najveću vrijednost na sredini, ali je znatno veća i iznosi oko 3300 A, dok joj na krajevima cjevovoda joj vrijednost znatno pada.



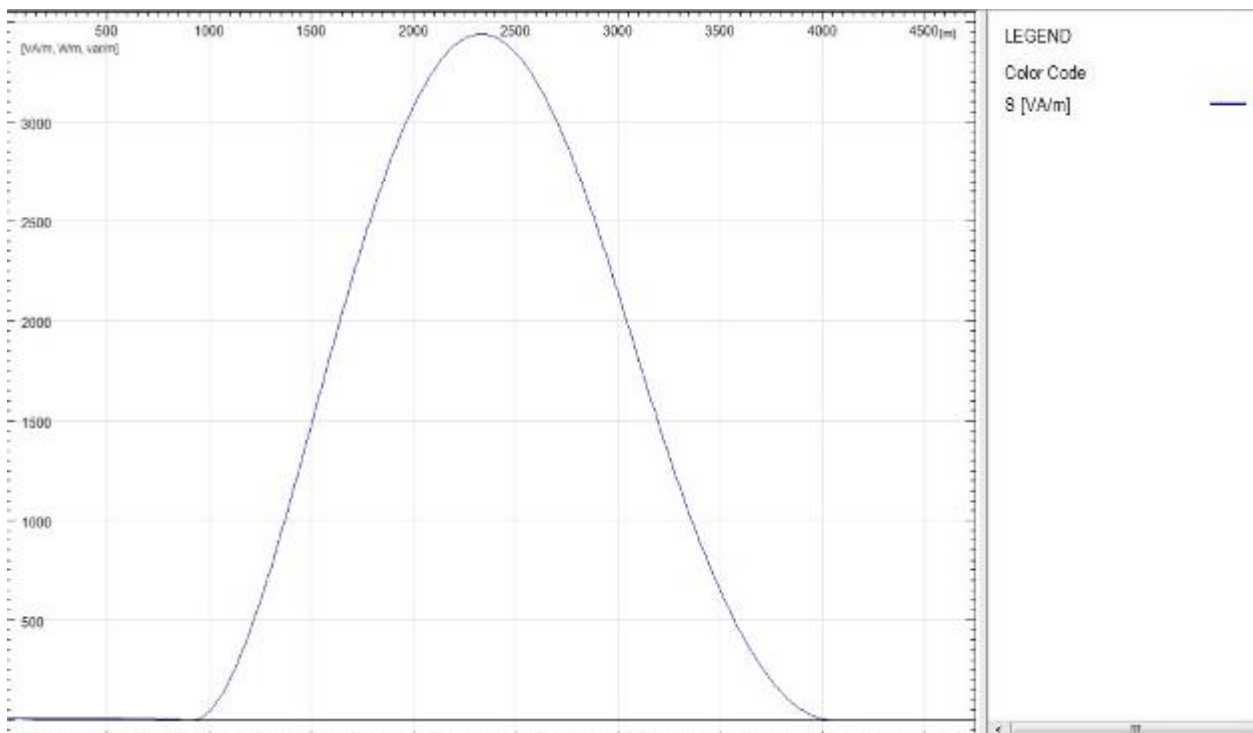
Slika 5.31. Inducirana elektromotorna sila koja djeluje na cjevovod



Slika 5.32. Potencijal na premazu cjevovoda



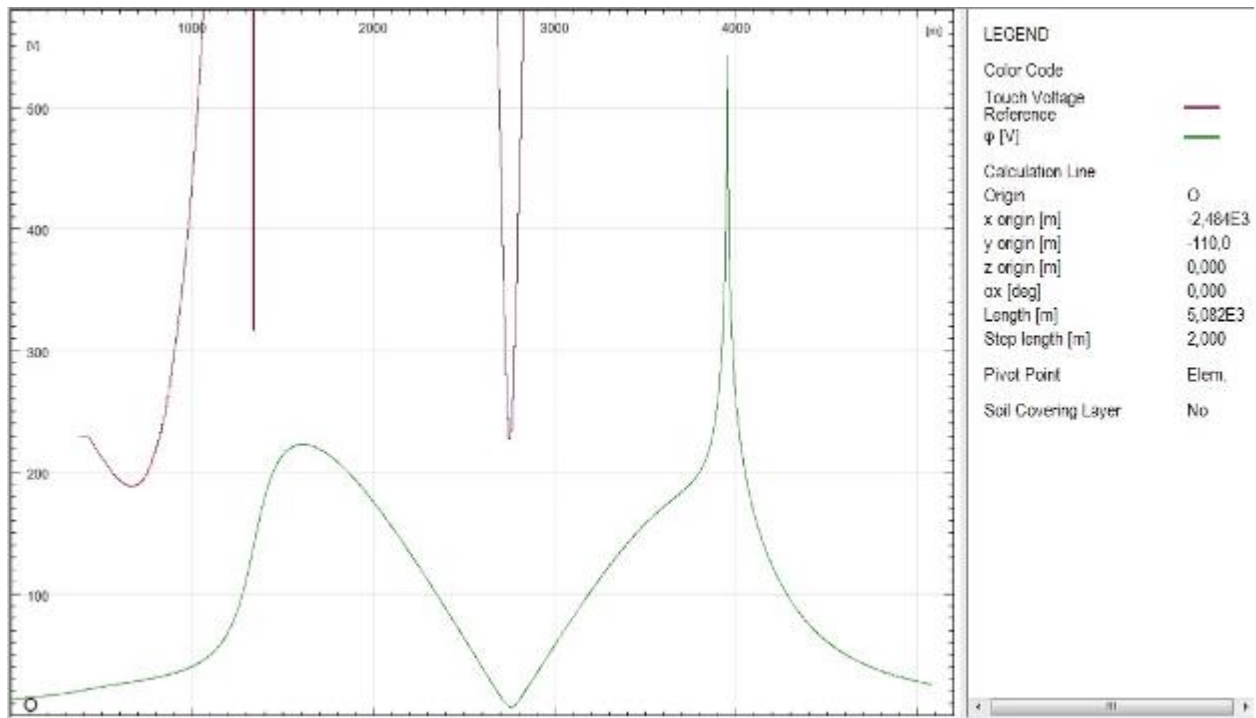
Slika 5.33. Potencijal na premazu cjevovoda 3D



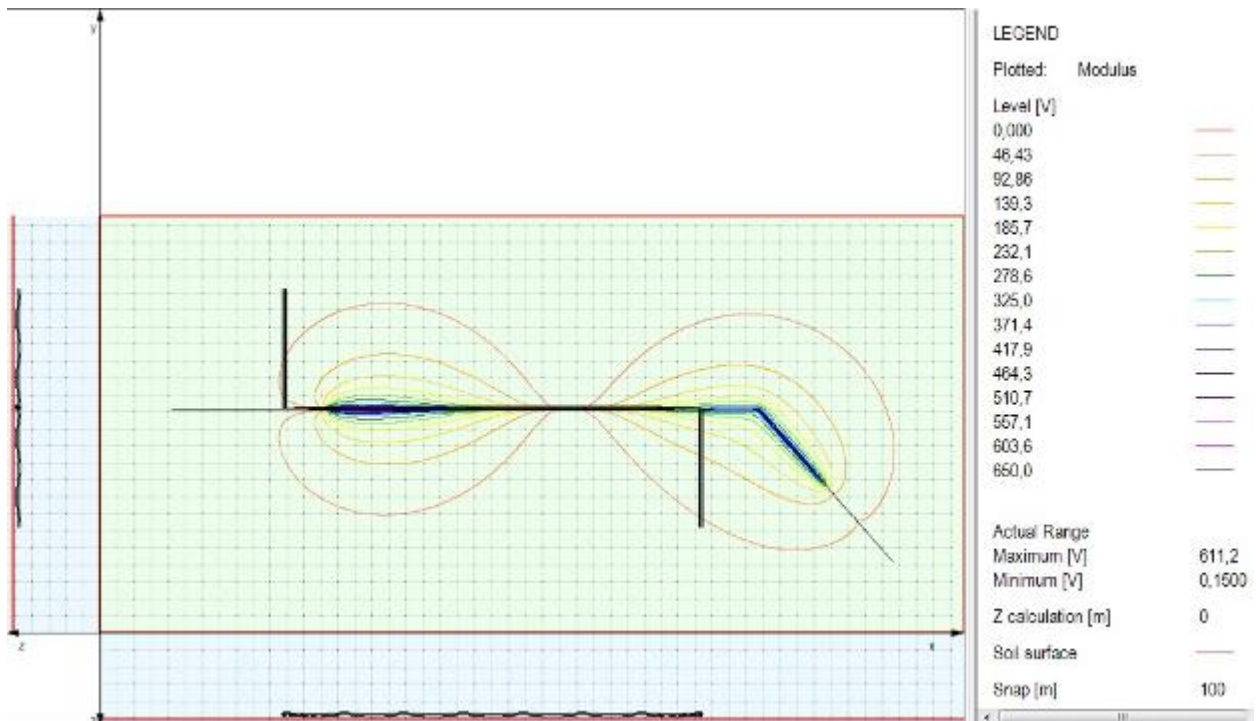
Slika 5.34. Disipirana snaga na cjevovodu

Velikom strujom kvara došlo je i do velikog porasta vrijednosti elektromotorne sile te snage disipacije na središnjem dijelu cjevovoda. Potencijal na premazu cjevovoda ima maksimalnu

vrijednosti na krajevima paralelnog pružanja te je otprilike veća za 100 puta nego u slučaju normalnog rada dalekovoda.

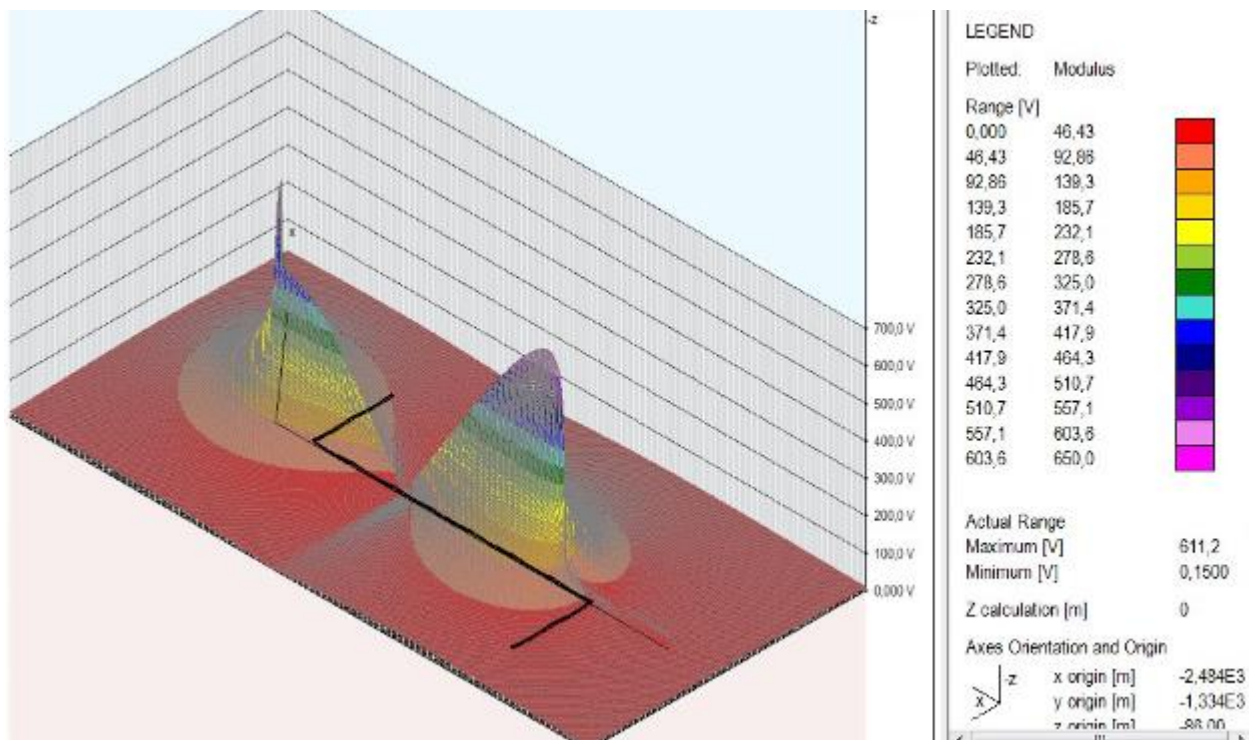


Slika 5.35. Napon dodira



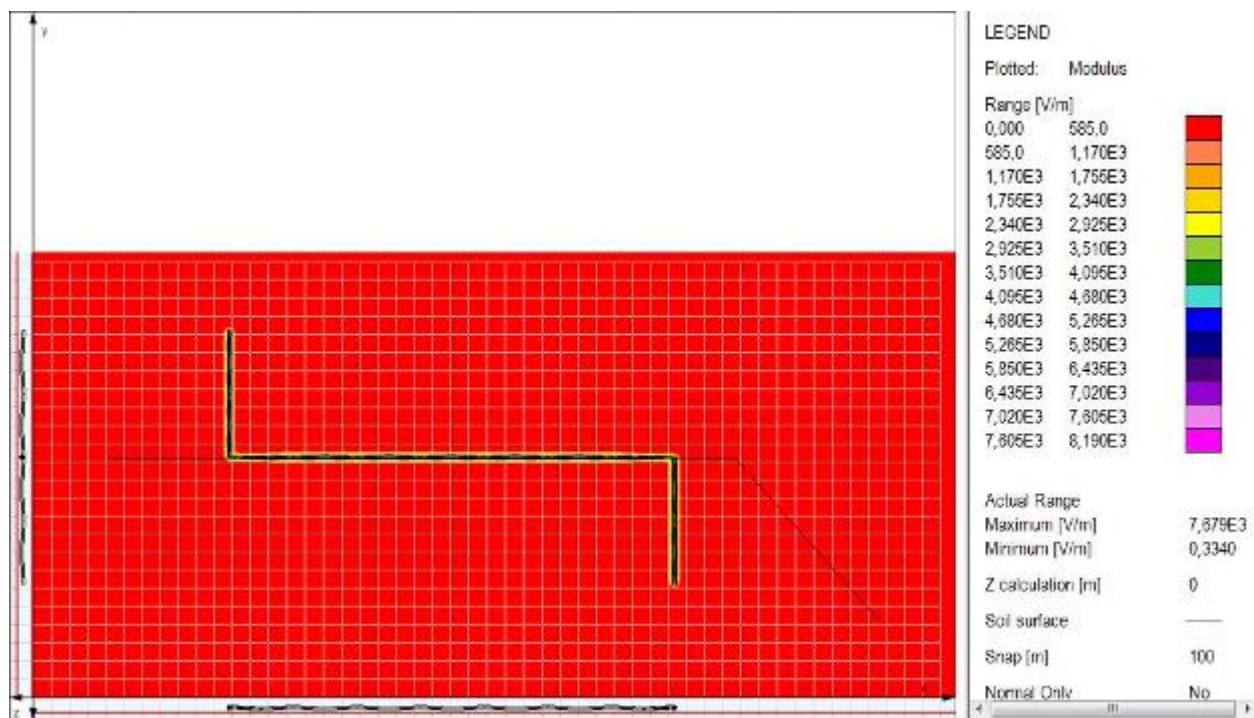
Slika 5.36. Napon dodira, konturni prikaz



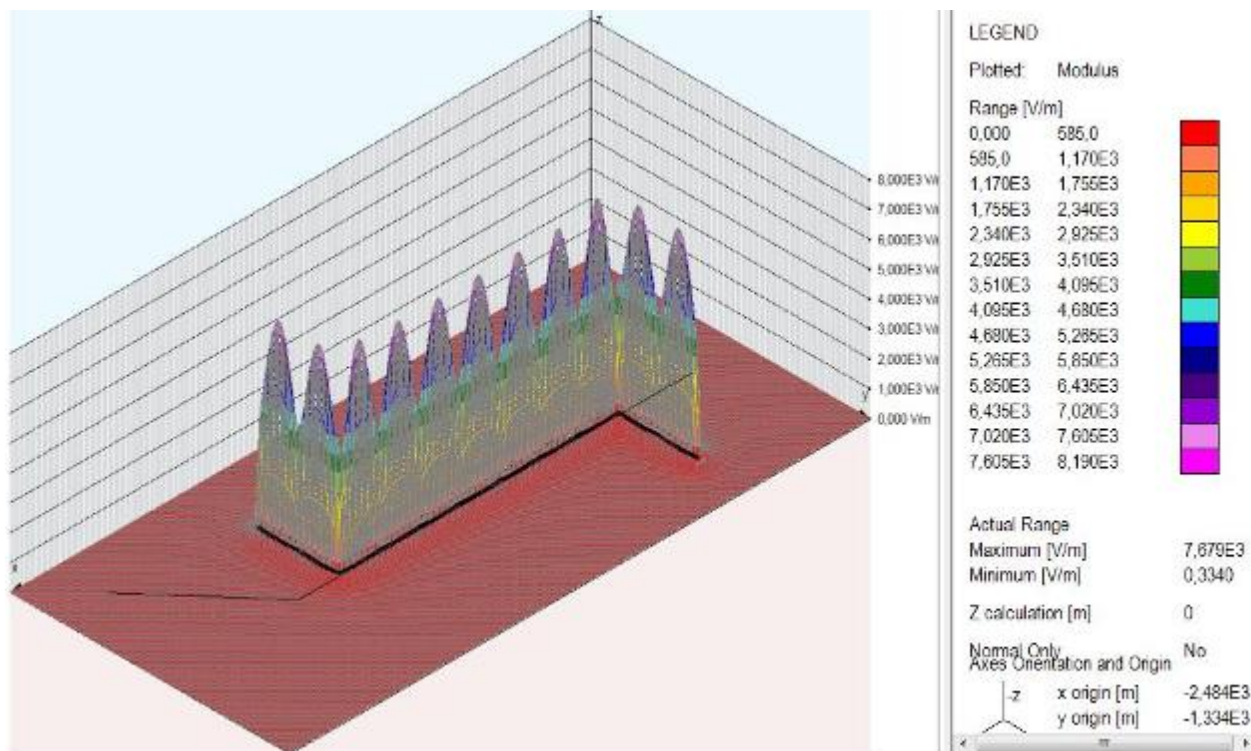


Slika 5.37. Napon dodira 3D

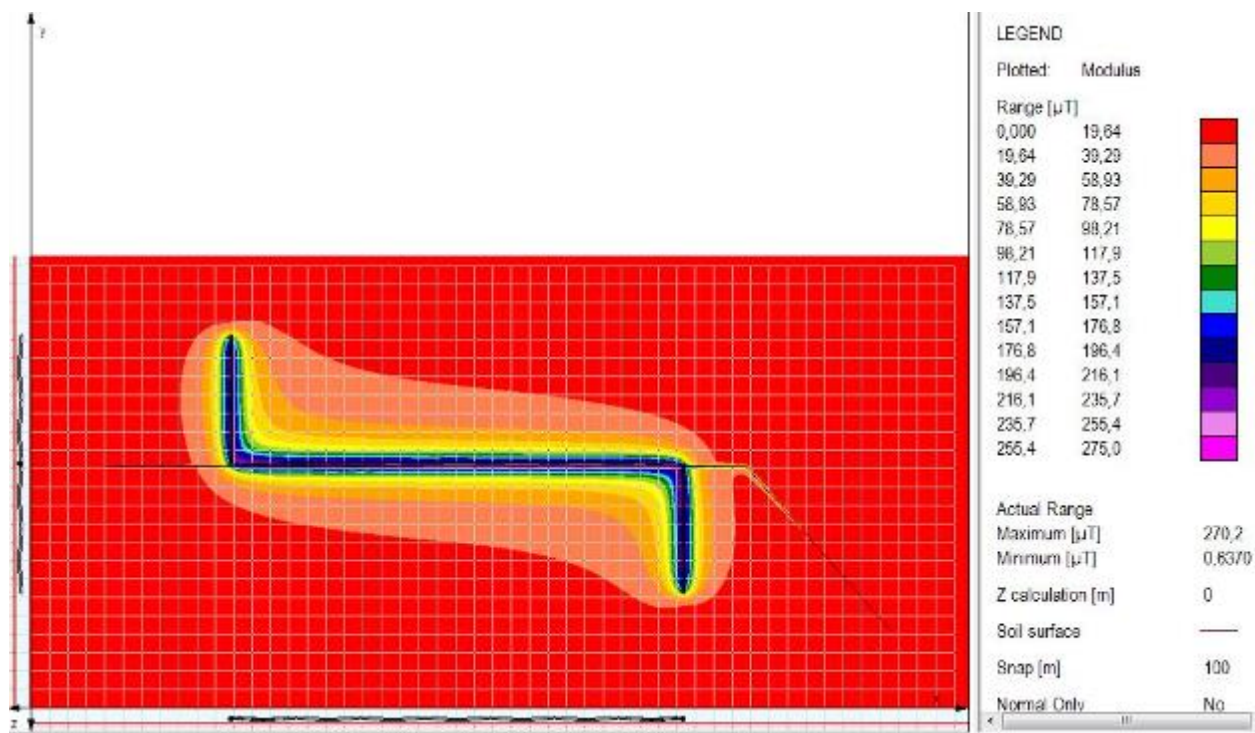
Vrijednosti napona dodira su također uvećane za oko 100 puta u slučaju kvara, a iz slike 5.36. vidljivo je da se to područje proširilo u odnosu na slučaj normalnog pogona.



Slika 5.38. Raspodjela električnog polja na površini tla

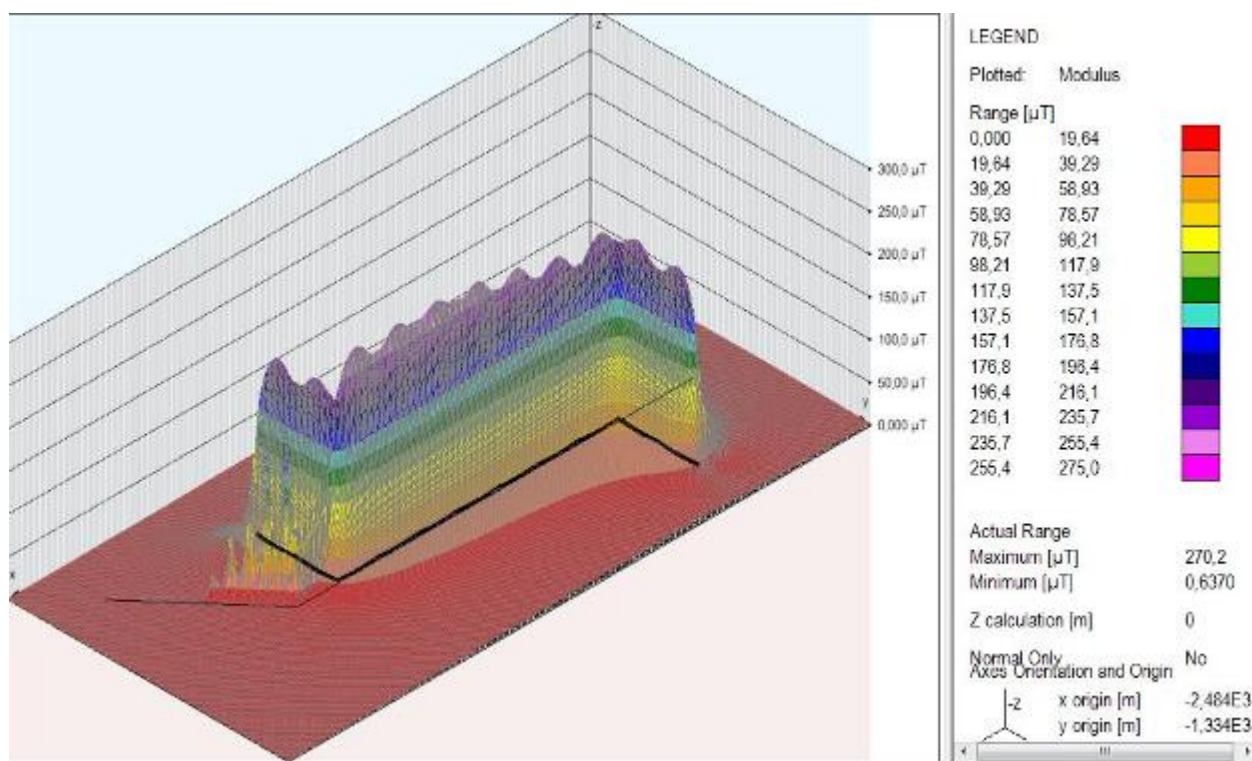


Slika 5.39. Raspodjela električnog polja na površini tla 3D



Slika 5.40. Raspodjela magnetskog polja na površini tla





Slika 5.41. Raspodjela magnetskog polja na površini tla 3D

Raspodjela i jakost električnog polja ostale su približno iste kao i slučaju normalnog rada dalekovoda dok je u slučaju magnetskog polja došlo do bitnih promjena budući da je povećano magnetsko polje rezultat velike vrijednosti struje kratkog spoja. Iz slike 5.40. vidljivo je da se djelovanje magnetskog polja proširilo te da je njegova vrijednost oko 20 puta veća nego u slučaju normalnih uvjeta rada i iznosi 270,2  $\mu\text{T}$ .

## 6. ZAKLJUČAK

U ovom radu izrađen je model dalekovoda 400 kV te ukopanog cjevovoda na dubini od 1m, koji dijele zajednički, paralelni koridor. Simulacije i analiza provedene su u programskom alatu XGSLab u slučaju normalnih radnih uvjeta te u slučaju kvara dalekovoda. Cilj je bio prikazati inducirani napon na cjevovodu koji nastaje zbog djelovanja dalekovoda prilikom elektromagnetskih smetnji. Osim prikazanih simulacija i vrijednosti inducirano napona analizirane su i druge vrijednosti poput struje cjevovoda, inducirane elektromotorne sile koja djeluje na cjevovod, struje propuštanja cjevovoda, potencijal premaza cjevovoda, disipirana snaga cjevovoda te struje propuštanja na malim nepravilnostima i oštećenjima premaza. Prikazani su i rezultati simulacije električnog i magnetskog polja te napon dodira. U normalnim uvjetima rada dalekovoda potencijal cjevovoda imao je najmanju vrijednost na sredini cjevovoda, no udaljavanjem od središta u smjeru duž cjevovoda on raste i dostiže maksimalne vrijednosti (98 V) na krajevima paralelnog pružanja cjevovoda i dalekovoda. Potencijal premaza te struja propuštanja cjevovoda imaju iste karakteristike kao i potencijal, najveće vrijednosti su im na krajevima paralelnog pružanja cjevovoda i dalekovoda. Uzdužna struja cjevovoda ima maksimalnu vrijednost na središtu cjevovoda (29,7 A) te ona slabi na krajevima cjevovoda. Električno i magnetsko polje pojavljuju se cijelom dužinom trase dalekovoda, a najveće vrijednosti pri površini tla nalaze se na središnjim dijelovima raspona između dalekovoda te iznose 8200 V/m, odnosno 13,07  $\mu$ T. Usporedbom sa zadanim normama i granicama vidljivo je da jakost električnog polja prelazi zadane granične vrijednosti za javne površine, kao i za područja povećane osjetljivosti, dok su vrijednosti ispod zadanih za nisko upozorenje za profesionalnu izloženost. Gustoća magnetskog toka zadovoljava granične vrijednosti u oba slučaja. Napon dodira ima najveće vrijednosti na krajevima paralelnog pružanja cjevovoda i dalekovoda (5,74 V) dok su na središnjem dijelu minimalni te zadovoljava zadane granične norme za trajno dopušteni dodirni napon. Za slučaj kvara dalekovoda korišten je jednofazni kratki spoj najbliže faze cjevovoda. Pretpostavljena struja kvara iznosila je 20000 A. Usporedbom rezultata, vidljivo je da je prilikom kvara dalekovoda potencijal cjevovoda također bio najveći na krajevima pružanja dalekovoda i cjevovoda, ali je njegova vrijednost porasla na otprilike 10000 V što je otprilike 100 puta veća vrijednost nego u slučaju normalnog rada dalekovoda. Uzdužna struja cjevovoda imala je najveću vrijednost na središtu cjevovoda 3243 A što je također otprilike 100 puta veća vrijednost. Karakteristike raspodjele struje propuštanja cjevovoda, elektromotorne sile, disipirane snage te struje propuštanja na malim nepravilnostima premaza cjevovoda također su ostale približno iste kao u slučaju normalnog rada dalekovoda, ali su znatno uvećane (oko 100 puta) zbog velike struje kvara. Napon



dodira povećao se na 611,2 V što je također velik porast i prijedena je granična vrijednost trajnog dodirnog napona, međutim dozvoljena granična vrijednost napona dodira ovisila bi o duljini trajanja kratkog spoja. Najveća vrijednost električnog polja računata pri površini tla iznosila je 7679 V/m što je manja vrijednost nego u normalnim radnim uvjetima dalekovoda. Struja kvara je znato utjecala i na magnetsko polje čije se djelovanje proširilo i njegova maksimalna vrijednost iznosi 270,2  $\mu\text{T}$  pri površini tla što je 20 puta veća vrijednost u odnosu na ispravan rad dalekovoda. Ovaj iznos gustoće magnetskog polja je prešao zadane granične norme od 100  $\mu\text{T}$  za javne površine, međutim radi se o kratkotrajnoj izloženosti, odnosno izloženost je jednaka duljini trajanja kratkog spoja. Usporedbom rezultata moguće je zaključiti da su se prilikom kvara dalekovoda sve izračunate vrijednosti, osim vrijednosti električnog polja, drastično povećale. Povećanje potencijala cjevovoda te napona dodira nepoželjno je zbog radnika i osoblja koje rade na održavanju cjevovoda. Također, nepoželjno je i povećanje stope gustoće struje propuštanja jer uzrokuje oštećenje i koroziju cjevovoda. Zbog toga potrebna je analiza navedenih vrijednosti kako bi se izbjegle opasnosti po čovjeka ili štetne posljedice za cjevovod.

## 7. SAŽETAK

Opis problema i smetnji na metalnim masama te u blizini dalekovoda, zadatak i model diplomskog rada opisani su u uvodnom dijelu rada. U drugom poglavlju prikazan je popis literature koji se koristio za objašnjenje teorije vezane za elektrostatske i elektromagnetske probleme i smetnje. U trećem poglavlju opisana su svojstva dalekovoda i cjevovoda, utjecaj smetnji te njihove moguće štetne posljedice. U četvrtom poglavlju prikazane su granične dozvoljene vrijednosti električnog i magnetskog polja te napona dodira na javnim površinama. Parametri modela, rezultati simulacija te njihova analiza opisani su i prokomentirani u petom poglavlju. U šestom poglavlju opisani i uspoređeni su rezultati simulacija za oba slučaja rada dalekovoda, u normalnim radnim uvjetima i u uvjetima kratkog spoja.

Ključne riječi: inducirani napon, elektromagnetsko polje, elektrostatsko polje, cjevovod, dalekovod

## **8. ABSTRACT**

The description of the problem and the disturbances on the metal masses near the transmission line, the task and the model of diploma thesis are described in the introductory part of the paper. The second chapter presents a list of references used to explain theories related to electrostatic and electromagnetic problems and disturbances. The third chapter describes the properties of transmission lines and pipelines, the impact on interference of their possible harmful consequences. In the fourth chapter, the permissible values of electric and magnetic fields and touch voltage in public areas are shown. The model parameters, simulation results and their analysis are described and commented in the fifth chapter. The sixth chapter describes and compares the simulation results for both cases of transmission lines, in normal operating conditions and in short circuit conditions.

Keywords: induced voltage, electrostatic field, electromagnetic field, pipeline, transmission line

## 9. LITERATURA

- [1] D. D. Micu, G. C. Christoforidis, L. Czumbil, „AC interference on pipelines due to double circuit power lines: A detailed study, Electric Power Systems Research, 1-8, Romania Greece, October 2013
- [2] N. T. BSc (Hons), MSc, PhD, CEng, FIET, M-CIGRE, „An introduction to the analysis of electrical interference from power lines to metal pipelines“, Power Systems Modelling and Fault Analysis (Second Edition), 835-861, 2019
- [3] X. Liu, W. Wang, H. Yu, „Analysis of mutual electromagnetic influence between transmission line and buried pipeline“, International conference on Information science and control engineering, 1410-1431, China, 2017
- [4] L. Qi, H. Yuan, Y. Wu, X. Cui, „Calculation of overvoltage on nearby underground metal pipeline due to the lightning strike on UHV AC transmission line tower“, Electric Power Systems Research, 54-63, China, January 2013
- [5] H. –U. Paul, H. G. Schoneich, „Interference effects of high-voltage transmission lines on pipelines“, Handbook of cathodic corrosion protection, Third edition, 505-533, 1997
- [6] Prof. Dr. A. A. Hossam-Eldin, W. Mokhtar, „Electromagnetic Interference Between Electrical Power Lines and Neighboring Pipelines“, 19th International Conference on Systems Engineering, 97-102, Egypt, 2008
- [7] B. P. Kumleh, M. H. Varahram, S. P. Kumleh, „ Mitigation of AC voltage occurring in pipeline located closed to electric transmission lines with design of Joint Right of Way“, IFAC Power Plants and Power Systems Control, 1151-1154, Seoul Korea, 2003
- [8] G. C. Christoforidis, D. P. Labridis, P. S. Dokopoulos, „Inductive interference calculation on imperfect coated pipelines due to nearby faulted parallel transmission lines“, Electric Power Systems Research, 139-148, Greece, December 2002
- [9] N. M. K. Abdel-Gawad, A. Z. El Dein, M. Magdy, „Mitigation of induced voltages and AC corrosion effects on buried gas pipeline near to OHTL under normal and fault conditions“, Electric Power Systems Research, 297-306, October 2015
- [10] M. Ouadah, O. Touhami, R. Ibtouen, M. F. Benlamouar, M. Zergoug, „Corrosive effects of the electromagnetic induction caused by the high voltage power lines on buried X70 steel pipelines“, International Journal of Electrical Power & Energy Systems, 34-41, Algeria, October 2017

- [11] O. E. Gouda, A. Z. El Dein, M. A. H. El-Gabalawy, „Effect on electromagnetic field of overhead transmission lines on the metallic gas pipe-lines“, *Electric Power Systems Research*, 129-136, Egypt, October 2013
- [12] Y. Guo, T. Meng, D. Wang, H. Tan, R. He, „Experimental research on the corrosion of X series pipeline steels under alternating current interference“ *Engineering Failure Analysis*, 87-98, August 2017
- [13] A. Popoli, L. Sandrolini, A. Cristofolini, „A quasi-3D approach for the assessment of induced AC interference on buried metallic pipelines“, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*“, 538-545, Bologna Italy, March 2019
- [14] J. R. Daconti, „Management of electrical risks in transmission line-pipeline shared Rights-of-way“, *Environment concerns in Right-of-way management 8th international symposium*, 277-281, New York, 2008
- [15] ] M. A. Al-Gabalawy, M. A. Mostafa, A. S. Hamza, S. A. Hussein, „Modeling of the KOH-Polarization cells for mitigating the induced AC voltage in the metallic pipelines“, Egypt, February 2020
- [16] R. Djekidel, S. A. Bessedik, P. Spiteri, D. Mahi, „Passive mitigation for magnetic coupling between HV power line and aerial pipeline using PSO algorithms optimization“, *Electric Power Systems Research*, 18-26, Algeria, France, December 2018
- [17] D. Tang, X. Yang, J. Yong, W. Xu, „Active method for mitigation of induced voltage in integrated energy systems“, *Applied Energy*, 553-563, Canada, China, February 2019
- [18] D. med. prof.dr.sc. Milan Kujundžić, “Pravilnik o izmjenama i dopunama pravilnika o zaštiti od elektromagnetskih polja,” vol. 2019, 2019
- [19] D. med. doc.dr.sc. Dario Nakić, “Pravilnik o zdravstvenim uvjetima kojima moraju udovoljavati radnici koji obavljaju poslove s izvorima neionizirajućeg zračenja,” vol. 2016, no. 1, 2016.
- [20] Prof. dr. sc. Mirando Mrsić, “Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom,” vol. 2019, 2019

## 10. ŽIVOTOPIS

Hrvoje Vida rođen je 4. studenog 1986. godine u Našicama. Nakon završene Osnovne škole Augusta Harambašića u Donjem Miholjcu upisuje srednju Elektrotehničku školu u Valpovu te nakon četiri godine školovanja stječe zvanje Elektrotehničar. Svoje školovanje nastavlja 2005. godine na Elektrotehničkom fakultetu u Osijeku na kojem upisuje Stručni studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika. 2016. godine stječe zvanje Stručnog prvostupnika (Baccalaureus) inženjera elektrotehnike, smjer Elektroenergetika te iste godine upisuje Razlikovne obaveze kako bi se mogao kandidirati na upis za Diplomski studij. 2018. godine upisuje diplomski studij elektrotehnike, smjer Elektroenergetika, izborni blok Industrijska elektroenergetika.