

# Modeliranje i analiza sustava uzemljenja programskim paketom ANSYS

---

**Jakopović, Karlo**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2022**

*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:200:373461>

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

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-12-19**

*Repository / Repozitorij:*

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



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

**Sveučilišni studij**

**MODELIRANJE I ANALIZA SUSTAVA UZEMLJENJA  
PROGRAMSKIM PAKETOM ANSYS**

**Diplomski rad**

**Karlo Jakopović**

**Osijek, 2022.**

# SADRŽAJ

|  |    |
|--|----|
| 1. UVOD.....   | 1  |
| 1.1. opis zadatka.....                                   | 1  |
| 2. PREGLED LITERATURE.....                               | 2  |
| 3. OPĆENITO O UZEMLJENJU.....                            | 3  |
| 3.1. podjela uzemljenja.....                             | 5  |
| 4. SVOJSTVA TLA.....                                     | 9  |
| 4.1. tipovi tla.....                                     | 9  |
| 4.2. tipovi tla u republici hrvatskoj.....               | 11 |
| 4.3. dodatni utjecaji na otpornost tla i uzemljivač..... | 13 |
| 5. PRIKAZ POSLJEDICA KVAROVA.....                        | 16 |
| 5.1. napon dodira i napon koraka.....                    | 17 |
| 5.1.1. NAPON DODIRA.....                                 | 18 |
| 5.1.2. NAPON KORAKA.....                                 | 21 |
| 5.1.3. OSTALI TIPOVI NAPONI DODIRA.....                  | 23 |
| 5.2. slučaj udara groma.....                             | 25 |
| 6. TIPIČNE GEOMETRIJE UZEMLJIVAČA.....                   | 28 |
| 6.1. štapni uzemljivač.....                              | 28 |
| 6.2. trakasti uzemljivač.....                            | 32 |
| 6.3. prstenasti uzemljivač.....                          | 36 |
| 6.4. mrežasti uzemljivač.....                            | 37 |
| 7. ANSYS SIMULACIJA.....                                 | 39 |
| 7.1. zadatak 1.....                                      | 40 |
| 7.2 zadatak 2.....                                       | 57 |
| ZAKLJUČAK.....   | 61 |
| LITERATURA.....  | 62 |
| ŽIVOTOPIS.....   | 64 |
| SAŽETAK.....   | 65 |
| PRILOZI.....   | 66 |

## 1. UVOD

Svaki elektroenergetski sustav ima instalirano na sebi neku vrstu uzemljenja s ciljem zaštite mreže, opreme i u konačnici ljudi od neželjenih posljedica koje mogu nastati zbog vanjskih utjecaja, kvarova ili ljudske pogreške. Pod pojmom elektroenergetski sustav smatramo ne samo dalekovode i trafostanice nego taj sustav također čine stambeni i poslovni objekti koji su povezani s istim tim elektroenergetskim sustavom. Stoga možemo u grubo reći da elektroenergetski sustav u cjelini čine sve naponske razine od 400 V pa sve do 400 kV ili i više. Kada to znamo onda možemo zaključiti da u svim tim postrojenjima postoji potreba za nekom vrstom uzemljenja koje štiti sami objekt i ljude u njemu.

Svaka vrsta uzemljivačkoga sustava ima svoju svrhu kojoj je namijenjena za pravilan rad elektroenergetskog sustava, ali svaka ta vrsta ima zajedničko da mogu koristiti iste tipove uzemljivača. Ovim radom će se baviti općenitim pogledom na tipove uzemljivača zajedno s njihovim izgledom, primjenom i formulom za određivanje otpora uzemljenja, pri tome se neće ići u dubinu što se tiče pogleda na tipove mjerenja otpornosti tla. U konačnici će se odraditi na određenom tipu uzemljivača kako se on ponaša prilikom pojave kvara.

### 1.1. Opis zadatka

U diplomskom radu potrebno je izložiti teorijske osnove rada uzemljivača i sustava uzemljenja. Definirati osnovne pojmove i fizikalne veličine vezane uz uzemljivače i sustave uzemljenja. Opisati područja primjene uzemljivača. Osvrnuti se na utjecaj tla na parametre uzemljivača. Osvrnuti se na važeće standarde (norme) te preporučene prakse uzemljivanja. U dogovoru s mentorom, odabrati primjer(e) za modeliranje i analizu uzemljivača korištenjem programskog paketa ANSYS. Pri tome je potrebno odrediti otpor rasprostiranja te razdiobu skalarnog električnog potencijala na površini tla. Izlaganje je potrebno poduprijeti izračunima, grafičkim prikazima i shemama.

## 2. PREGLED LITERATURE

Literatura [1] predstavlja bazičnu literaturu za područje uzemljenja gdje se autor Majdančić detaljno bavi problematikom koja stoji iza uzemljenja, a dopuna literaturi [1] je [2] gdje je naglasak autor Požar stavio na funkcioniranje elektroenergetskih postrojenja, a dio poglavlja u vezi uzemljenja se obrađuje samo za potrebe postrojenja kao što je napon koraka i napon dodira.

U Literaturi [3] su objašnjeni pojmovi napon dodira i napon koraka te kako se oni određuju na čovjeku. U literaturi [4] je navedena web stranica koja se bavi elektrotehničkim pojmovima objašnjeno funkcioniranje pogonskoga uzemljenja. Na literaturi [5] se nalazi web stranica gdje su objašnjeni sustavi za zaštitu od munje od strane kompanije DEHN koja se bavi zaštitom od prenapona kod udara munje. Literature [6] i [14] su diplomski radovi u koji su se bavili uzemljivačima i sustavima uzemljenja gdje se pod [6] bavi općenito o uzemljivačima, a [14] se više bavi impulsnim odzivima. Literatura [7] su materijali s predavanja iz kolegija „Uzemljivači i sustavi uzemljenja”. Literatura [8] je završni rad u kojemu se objašnjava električno sondiranje s više geološkog gledišta. Literatura [9] je knjiga gdje autor detaljno objašnjava geofiziku tla, o mjerenjima koja se obavljaju za potrebe određivanja otpornosti tla i o tlu općenito. Literatura [10] je američka norma koja je vezana za uzemljivače u kojoj su objašnjene metode određivanja otpora uzemljenja, dopušteno trajanje protoka struje kroz ljudsko tijelo, karakteristike tla i slično. Literatura [11] je udžbenik za potrebe obavljanja laboratorijskih vježbi iz kojega su preuzete slike za potrebe prezentiranja napona dodira i napona koraka. Literatura [12] predstavlja pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom prema hrvatskim normama koji je nalazi u narodnim novinama. Literatura [13] je web stranica koja se bavi elektrotehnikom i objašnjeno je 6 tipova napona kojima može biti izložen čovjek u trafostanicama. U Literaturi [15] se autor bavi osvrtom na članak o problematici prenesenog potencijala u postrojenjima. Pod literaturama [16] i [17] se nalazi web stranica distributera uzemljivačke opreme s koje su preuzete slike štapnog i trakastog uzemljivača. U Literaturi [18] se nalazi katalog koji je poslužio da objašnjavanje raznih tipovima štapnih uzemljivača. U Literaturi [19] se nalazi web stranica u kojoj je objašnjeno kako vodovodna cijev može poslužiti kao trakasti uzemljivač. Literature [20] i [21] su priručnici za lakše shvaćanje pojmova i koraka u programu ANSYS. Pod literaturom [22] se nalazi slika mrežnog uzemljivača.

### 3. OPĆENITO O UZEMLJENJU

Na uzemljenje se moraju spajati sve metalne mase (metalna kućišta) jer prilikom pojave kvarova u mreži, a koji su posljedica jednofaznih kratkih spojeva ili udara munje, struja poteče i kroz sustave uzemljenja. Za posljedicu dolazi do pojave napona koji mogu biti pogubni za čovjeka, ako se nalazi u neposrednoj blizini uzemljivača. Kako bi se to izbjeglo vrlo je važno pravilno dimenzionirati sustav uzemljenja da napon koraka i napon dodira budu unutar dozvoljenih granica koji su definirani normama. Nije to jedina zadaća uzemljenja jer osim zaštite ljudi ono nam služi i prilikom dimenzioniranja zaštitnih uređaja koji se nalaze u trafostanicama, odvođenju munja prema zemlji umjesto od udara u objekte, ograničavanju kapacitivnih struja zemljospoja, spajanje nul vodiča sa zemljom da ono zbilja bude 0 volti u električnim instalacijama.

Za početak trebamo razlikovati pojmove kao što su uzemljenje, uzemljivač i zemljovod te koja je njihova zadaća u elektroenergetskom sustavu.

- Uzemljivač: to su svi metalni dijelovi koji se postavljaju u zemlju na određenoj dubini kako bi tvorili kontakt sa zemljom.
- Zemljovod: vod koji spaja uzemljivač s metalnim dijelovima u postrojenjima ili instalacijama.
- Uzemljenje: predstavlja galvanski spoj između metalnog, uzemljenog dijela elektroničkog uređaja, postrojenja ili neke točke mreže koja iz bilo kojeg razloga može biti pod naponom i zemlje pomoću uzemljivača [1].

Svaki uzemljivački sustav mora biti pravilno projektirani s obzirom na lokaciju u kojoj se nalazi. Uzemljenje se izvodi sustavom vodiča koji moraju svojim dimenzijama i oblikom, skupa sa slojevima okolišnog tla, spriječiti sve štetne posljedice koje nastaju pri poremećaju sustava i stvaraju napona opasnog po čovjeka i živa bića [1]. To bi u prijevodi značilo kako se uzemljenje nikako ne bi smjelo olako shvaćati jer kriva procjena, odnosno pogrešno isprojektirano uzemljenje, može dovesti do ozbiljnih posljedica. Naravno, kada je riječ o uzemljenju nekoga stambenoga objekta tada je bilo kakvo uzemljenje bolje nego da ga nema uopće. Pod pojmom „bilo kakvo” se može smatrati pocinčani štapni uzemljivač koji se polaže na određenoj dubini,

obično na 0.8 m. To nikako ne smije biti pravilo kada govorimo o malim ili velikim trafostanicama, elektranama ili bilo kakvo gospodarskom objektu nego se tamo trebaju izvoditi proračuni uzemljivačkih sustava.

Sada kada se su u grubo prošli problemi zbog kojih bi se trebalo postaviti uzemljenje, treba definirati pojmove za lakše razumijevanje same problematike prilikom prolaska struje kroz uzemljivač.

Pojmovi:

- Otpor rasprostiranja ( $R_r$ ): otpor koji prolasku struje pruža onaj dio zemlje koji se nalazi između uzemljivača i zone u kojoj se struja širi kroz toliko veliki presjek tla da njezina gustoća postaje vrlo mala [1]. Onaj dio zemlje koji se nalazi van granica onih kroz koji struja teče naziva se neutralna zemlja.
- Otpor uzemljenja ( $R_z$ ): otpor koji se definira kao suma otpora rasprostiranja ( $R_r$ ) i otpora zemljovoda ( $R_{zv}$ ).

$$R_z = R_r + R_{zv} \quad (3-1)$$

Uspoređujući otpor rasprostiranja s otporom zemljovoda vrlo jednostavno možemo zaključiti da je otpor rasprostiranja puno veći. Na osnovu toga, da si pojednostavimo izračun, zapisujemo da je otpor uzemljenja približno jednak otporu rasprostiranja:

$$R_z \simeq R_r \quad (3-2)$$

- Impulsni otpor uzemljenja ( $R_i$ ): mjerodavan je za odvođenje struje munje koja ima oblik kratkog impulsa[1]. Pri provođenju takvih impulsnih struja, impulsni otpor uzemljenja  $R_i$  nema istu vrijednost kao pri provođenju izmjenične struje tehničke frekvencije ili istosmjerne struje, i ima veću ili manju vrijednost u ovisnosti od duljine uzemljivača, oblika i trajanja prenaponskoga vala te specifičnoga otpora tla [1].
- Struja uzemljenja ( $I_z$ ): struja koja proteče kroz uzemljivač kod pojave mrežnih kvarova ili udara munje. U slučaju kvarova u mreži tada je struja frekvencije 50 Hz ili 60 Hz, ovisno o frekvenciji toga elektroenergetskog sustava, ili visokih frekvencija kod udara munje.
- Otpornost tla ( $\rho_z$ ): specifični otpor tla i zapisuje se u ommetrima ( $\Omega\text{m}$ ). Određuje se mjerenjem pomoću pokusa na mjestu postavljanja uzemljenja, a može se uzeti i gruba

vrijednost preko karte otpornosti tla. Specifični otpor tla je najvažniji podatak koji se primjenjuje kod određivanja otpora uzemljenja, a vrijednost ovisi o vlazi tla, temperaturi tla, vrsti tla i udaljenosti mjernih sondi.

- Napon dodira ( $U_d$ ): razlika potencijala između porasta potencijala zemlje mreže ili sustava uzemljenja i površinskog potencijala na točki gdje bi osoba mogla stajati dok istovremeno ima ruku u kontaktu s uzemljenom strukturom [3].
- Napon koraka ( $U_k$ ): Razlika u površinskom potencijalu koju bi osoba mogla iskusiti premošćući stopalima udaljenost od 1 m bez dodirivanja uzemljenog predmeta [3].

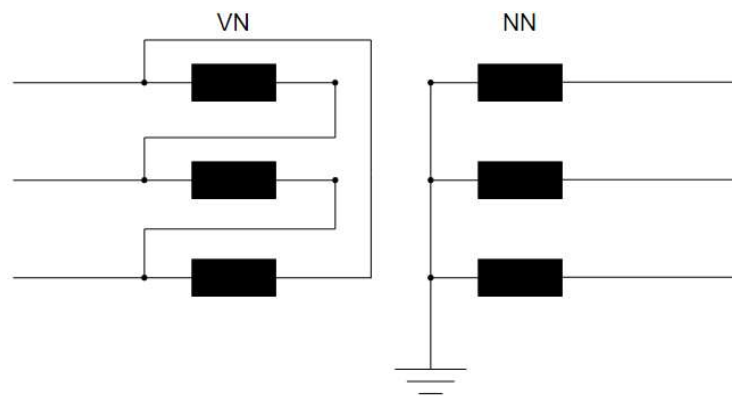
### 3.1. Podjela uzemljenja

Postoje razne podjele uzemljenja koje se primjenjuju u postrojenjima, pa tako uzemljenje možemo svrstati na zaštitno uzemljenje, pogonsko uzemljenje, gromobransko uzemljenje i združeno uzemljenje. Gromobransko se još naziva i uzemljenje odvodnika prenapona. Materijali koji se rabe za izradu uzemljivača i zemljovoda mogu biti izrađeni od bakra, aluminija ili pocinčanog čelika, dok vrste uzemljivača mogu biti plošni, cjevasti, pločasti i štapni.

Uzemljenje nule (pogonsko uzemljenje) nije ništa drugo nego spajanje neutralne točke opskrbnog sustava ili rotacionog stroja ili transformatora na uzemljenje izravno ili preko nekih elemenata strujnog kruga [4]. Na slici 3.1 je prikazano uzemljenje zvjezdišta transformatora, ali isto tako se moglo prikazati uzemljenje zvjezdišta generatora (shema spoja je identična kada bi zanemarili trokut spoj na VN strani) ili kod niskonaponskih mreža (TN-C-S, TN-C, TN-S mreža).

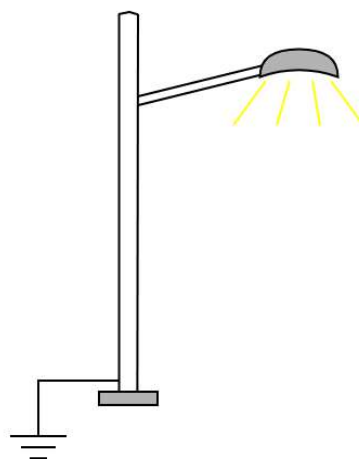
Pogonsko uzemljenje nije pravilo da se uvijek mora instalirati, ono može biti i izolirano od uzemljivača, tada govorimo o izoliranome zvjezdištu. U slučaju da uzemljenje zvjezdišta postoji tada može biti direktno ili preko elemenata strujnog kruga kao što su otpornik, Petersenov svitak (prigušnica) ili uzemljivački transformator.





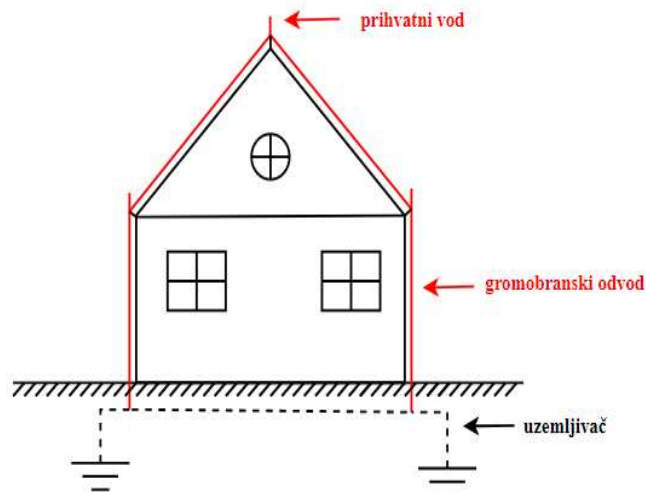
**Slika 3.1** Pogonsko uzemljenje NN strane (zvjezdista) transformatora u spoju DY

Zaštitno uzemljenje se primjenjuje kao preventivna zaštita u slučaju izbijanja kvara na metalna kućišta uređaja ili konstrukcija. Bitna razlika između pogonskoga i zaštitnoga uzemljenja je u tome što zaštitno uzemljenja ne sudjeluje u prijenosu električne energije što bi značilo da nije sastavni dio strujnoga kruga. Najbolji primjer kojeg se susreće u svakodnevnom životu su stupovi javne rasvjete, prikazano na slici 3.2, gdje je metalni stup spojen na uzemljivač. Metalni stup nikako ne smije doći u kontakt s vodovima unutar stupa u normalnome pogonu nego isključivo kod pojave kvarova kao što je oštećenje izolacije vodiča, pojava vlage između vodiča i stupa, i sl. Primjere zaštitnoga uzemljenja susrećemo kod niskonaponskih mreža (TT i IT mreže), uzemljenja metalnih konstrukcija unutar elektroenergetskih postrojenja, uzemljenja cijevi plinovoda, itd.



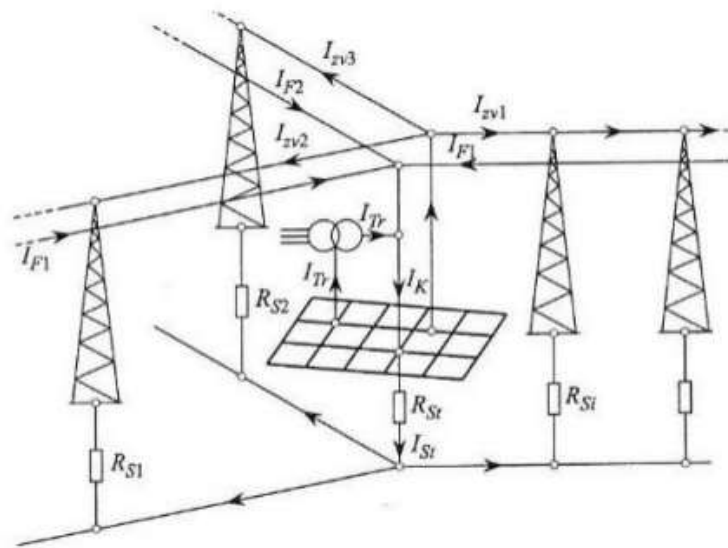
**Slika 3.2** Zaštitno uzemljenje javne rasvjete

Funkcija sustava zaštite od groma (eng. LPS, light protection system) je zaštita građevina od požara ili mehaničkog razaranja te sprječavanje ozljeda ili čak smrti osoba u zgradama [5]. Cjelokupni sustav zaštite od munje sastoji se od vanjske zaštite od munje (zaštita od munje/uzemljenja) i unutarnje zaštite od munje (zaštita od prenapona) [5]. Gromobransko uzemljenje treba dimenzionirati za uvjete impulsne struje munje, pa se zbog toga naziva i impulsni uzemljivač [1]. Vanjska zaštita od munje ima funkciju da preusmjeri grom na sebe preko prihvatnog voda, nastalu struju putem gromobranskih odvoda odvede u zemlju te raspodjeli struju po uzemljivaču u zemlji. Unutarnja zaštita od munje za to vrijeme ima zadatak da spriječi pojavu električnog luka unutar objekta, kao posljedica prenapona, spajanjem kompletne instalacije na točku (sabirnicu) zajedničkoga potencijala. Sustav zaštite od groma se sastoji od četiri razine, od LPL I do LPL IV (eng. light protection level).



**Slika 3.3** Gromobransko uzemljenje stambenog objekta

Prema slici 3.4 možemo vidjeti prikaz združenoga uzemljenja određenog elektroenergetskoga sustava. Način spajanja toga uzemljenja se temelji na povezivanju različitih tipova uzemljenja na isti uzemljivač. Promatrajući primjer sa slike 3.4 vidimo da se združeno uzemljenje sastoji od pogonskoga uzemljenja zvjezdišta transformatora i zaštitnoga uzemljenja stupova dalekovoda koji na svome vrhu imaju i zaštitno uže za zaštitu od udara groma. Kod ovakvoga tipa uzemljenja teže se može izračunati otpor uzemljenja jer na postrojenje dolazi nekoliko vodova različitih napona, pa se za projektiranje zajedničkoga uzemljenja uzima mreža koja najveću struju zemljospoja [6].



*Slika 3.4* Združeno uzemljenje [1]

## 4. SVOJSTVA TLA

### 4.1. Tipovi tla

Kod polaganja uzemljivača u zemlju, tlo igra važnu ulogu jer o njemu ovisi koliko materijala moramo ugraditi u zemlju. Količina materijala se definira u kakvim uvjetima se polaže uzemljivač, odnosno o kojemu tipu tla se radi. Tipovi tla se dosta razlikuju u svome sastavu, a svaki tip tla ima drugačiju vodljivost pa samim time je i otpornost tla ( $\rho_z$ ) drugačija. Najveća mana koju tlo posjeduje je njegova nehomogenost. Ta nehomogenost bi značila da bez obzira na to što se određeni tip tla nalazi na nekom području to ne znači da se na nekoj dubini ne nalazi neki drugi materijal, tipa kamen, koji će utjecati na otpornost samog tla i na njegovu vodljivost na način da ju poveća ili smanji. To se dodatno zakomplicirava kada znamo da na otpornost tla još dodatno utječu i vlaga i temperatura.

Kod instaliranja uzemljenja za bilo koji objekt vrlo je bitno da imamo dobar kontakt sa zemljom jer bolji kontakt (bolji uvjeti) znači manje problema koji mogu nastati kod pojave kvarova u mreži. Logički razmišljajući, bez potrebe za provjeravanjem u tablice otpornosti materijala, znamo da su metali vrlo dobri vodiči naspram zemlje.

Kao što je već rečeno, otpornost tla se mijenja s vlažnošću i temperaturom. Tome je tako jer je vodljivost struje u zemlji elektrolitske prirode te ovisi o količini disociranih iona, a ta količina opet o rastvorljivosti prisutnih soli i o stupnju vlažnosti tla [1]. Što je vlažnost veća vodljivost je bolja (otpornost tla je manja). Utjecaj temperature na vrijednost otpornosti može se zanemariti ukoliko ona nije ispod nule (0 °C) [1]. Ukoliko je temperatura niža od 0 °C tada dolazi to smrzavanja tla, a otpornost tla poprima vrlo visoke vrijednosti. Te vrijednosti otpornosti skoče s nekoliko desetaka ili stotina ommetara na nekoliko tisuća ommetara. Zato nam je bitno da se uzemljivači polažu na dubinu do koje neće doći pojava leda, obično 0.8 m dubine. Kao zaključak svega napisanoga, možemo reći da je zemlja ta koja nam stvara probleme kada dođe to pojave kvarova u mreži i treba razmotriti kako se riješiti njenih nedostataka.

**Tablica 4.1** Vrijednosti otpornosti tla s obzirom na tip tla [7]

| Tip tla                      | Otpornost tla $\rho_z$ [ $\Omega\text{m}$ ] |
|------------------------------|---|
| Morska voda                  | 0,1 – 1                                     |
| Slatka voda                  | 1 – 10                                      |
| Močvara                      | 5 – 40                                      |
| Glina                        | 20 – 120                                    |
| Vlažni pijesak               | 90 – 150                                    |
| Crnica                       | 50 – 200                                    |
| Suhi pijesak                 | 200 – 300                                   |
| Beton (armirani beton i tlo) | 50 – 500                                    |
| Šljunak                      | 400 – 2 000                                 |
| Kameno tlo (krš)             | 1 000 – 4 000                               |
| Led                          | 10 000 – 100 000                            |

Prema tablici 4.1 prikazane su vrijednosti za pojedine tipove tla. Prema toj tablici vidimo da se otpornosti tla povećavaju kako se količina zemlje smanjuje u sastavu tla. Najbolja usporedba je ako pogledamo razliku između crnice i krša. Također, što je tlo manje vlažnosti to je njegova otpornost veća, to se najbolje vidi između suhog i mokrog pijeska, pa bi stoga manja vrijednost otpornosti tla bila pola poslije kišovitog dana. Bitno je napomenuti da su ove vrijednosti u tablici 4.1 izmjerene kada imamo normalne (realne) klimatske uvjete koji nisu preekstremni (npr. suša, puno padalina, velike hladnoće), a to bi bilo proljeće. Naravno, vrijednosti za led su morale biti izmjerene pri vrlo niskim temperaturama u zimski periodima.

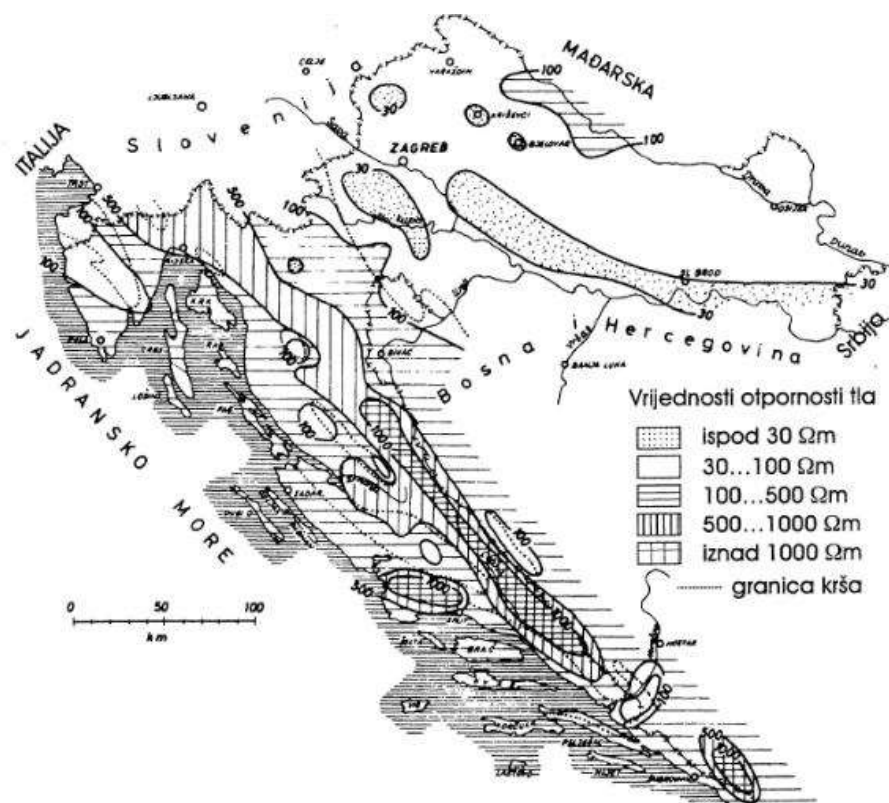
Većina prikazanih tipova tla se odnosi za sustave uzemljenja koji se polažu u tlo osim za vrijednosti koje su prikazane za beton. Te vrijednosti za beton su potrebni za vrstu uzemljenja koja se polaže u temelja objekta (temeljni uzemljivači).

## 4.2. Tipovi tla u Republici Hrvatskoj

U Republici Hrvatskoj postoji široki spektar tipova tla. Različiti tipovi tla se rasprostiru duž cijele države ovisno o geografskom području u kojemu se nalazi, a glavna područja na koja možemo podijeliti hrvatsku su kontinentalno i mediteransko područje. Svako od tih dvaju područja ima neka svoja specifična tla od kojih se sastoji pa tako možemo reći da se kontinentalno područje skoro pa i ne sastoji od stjenovitih podloga što bi u konačnici bitno utjecalo na vrijednosti otpornost tla.

Ljudi često u neformalnim govorima (gotovo uvijek) riječ „tlo” poistovjećuju s riječju „zemlja”. Naziv ili pojam „zemlja” (u užem ili širem smislu) nije nikako prikladan i ne valja se njime više koristiti [1].

Prilikom geotehničkih terenskih istraživanja najprije se koriste situacijski nacrti trase koja se ispituje i postojeća dokumentacija zadanog područja, te nakon toga slijede geofizička terenska istraživanja jer nam daju mnoštvo osnovnih informacija te su mnogo jeftinija od istražnih bušotina i služe za utvrđivanje rasporeda, debljine i svojstava pojedinih slojeva ispod površine terena [8]. Pod pojmom geofizička istraživanja spadaju brojne metode kao što su: gravimetrijska magnetometrijska, radiometrijska, geoelektrična, seizmička, geotermička, georadar i geofizička karotažna mjerenja [8]. Za potrebe određivanja električne otpornosti tla koriste se geoelektrična mjerenja, odnosno metoda vertikalnog geoelektričnog sondiranja. Geoelektrično sondiranje nam također služi za utvrđivanje dubine pojedinih slojeva od kojih se tlo sastoji, postojanje horizontalnih ili vertikalnih slojeva u tlu i sl. Najpoznatije geoelektrične metode koje se primjenjuju za određivanje električne otpornosti tla su Wennerova metoda i Schlumbergerova metoda. Da bi znali koliko je širok/dubok pojedini sloj u tlu trebamo međusobni razmak između sonde više puta povećavati duž pravca. Dok za otkrivanje postojanja horizontalnog ili vertikalnog slojevitog tla trebamo ponoviti postupak s istim vrijednostima razmaka između sonde, ali poprečno na prvi pravac mjerenja. U slučaju da nam se rezultati otpornosti tla uzduž pravca i poprečno na pravac podudaraju, tada se radi o horizontalno slojevitom tlu u suprotnom je tlo vertikalno slojevito.



*Slika 4.1 Vrijednosti otpornosti tla na području Hrvatske [9]*

Na slici 4.1 je prikazana raspodjela otpornosti tla za pojedine regije u Hrvatskoj. Treba napomenuti da ovu kartu izradio autor knjige [9] te daje samo grubi uvid u stanje otpornosti tla jer su mjerenja vršena samo za 1m dubine. Proučavajući kartu vidimo da su vrijednosti otpornosti tla na kontinentalnom dijelu Hrvatske dosta manjih vrijednosti nego li je to slučaj u mediteranskom području. Pa tako vrijednosti u kontinentalnom dijelu ne prelaze vrijednost od 100 Ωm (crnica, glina i močvarna područja), na mediteranskom području se vrijednosti kreću ovisno o udjelima crvenice i kamena u sastavu tla pa tako imamo vrijednosti od 100 Ωm do 500 Ωm (s većim udjelom kamena raste otpornost). Iznimka su mjesta koja se nalaze na području dinarida jer tamo prevladavaju kamenita tla s vrlo malim udjelima zemljanog sastava pa tamo vrijednosti prelaze 1 000 Ωm.

### 4.3. Dodatni utjecaji na otpornost tla i uzemljivač

U poglavlju 4.2. je navedeno da se mjerenja otpornosti tla uglavnom provode u razdobljima unutar godine koja nisu previše pod klimatskim utjecajem, pa se kao takav period može reći da je proljeće kada govorimo za hrvatsko podneblje. Mjerenja otpornosti tla u tom periodu nam daju referentne vrijednost otpornosti tla na osnovu kojih će se raditi usporedbe za ostala godišnja doba. Sezonske bi se promjene mogle uzeti u obzir tako da se mjerenja protegnu na vrijeme od najmanje jedne godine ili da se obavljaju u vrijeme zaleđivanja i suša [1]. Nova vrijednost otpornosti tla se računa prema formuli:

$$\rho_z = K_p \cdot \rho_{zi} \quad (4.3-1)$$

gdje je:  $\rho_z$  – nova (prepravljena) vrijednost otpornosti tla

$K_p$  – korekcijski koeficijent

$\rho_{zi}$  – stvarna (izmjerena) vrijednost otpornosti tla

Formula (4.3-1) se primjenjuje ako se mjerenja ne provode tijekom zaleđivanja i suša. Za dobivanje vrijednosti otpornosti tla koja je točnija koristi se korekcijski koeficijent  $K_p$ . Vrijednost toga koeficijenta, prikazano iz tablice 4.2, nije uvijek ista nego ovisi o kakvim uvjetima se radi kao što su dubina ukapanja uzemljivača, vlažnost tla i tip uzemljivača, te se on ne koristi ako je dubina ukopa veća od 3 m.

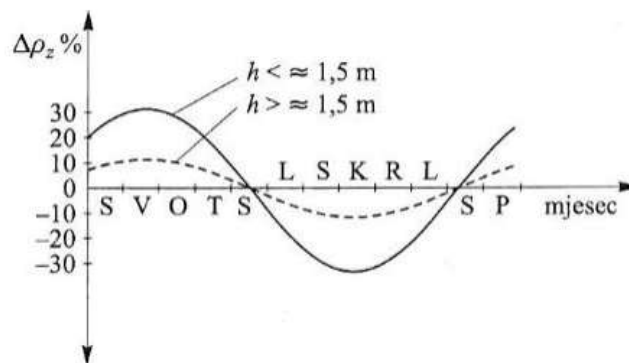
**Tablica 4.2** Vrijednosti korekcijskog koeficijenta  $K_p$  [1]

| Tip uzemljivača                                       | $K_p$ [/] |            |
|---|-----------|------------|
|   | Suho tlo  | Vlažno tlo |
| Trakasti uzemljivač položen na dubini od 0,8 m do 1 m | 1,4       | 1,8        |
| Trakasti uzemljivač položen na dubini od 2,5 m        | 1,25      | 1,45       |
| Vertikalni uzemljivač položen na dubini od 2 do 3 m   | 1,15      | 1,3        |
| Dubinski uzemljivač položen na dubini od 2,5 m do 3 m | 1         | 1,1        |



U tekstu prije je objašnjeno kada se upotrebljava korekcijski koeficijent, međutim nije bilo objašnjeno kako to temperatura, vlaga i sol utječe na vrijednosti otpornosti tla. Utjecaj temperature tla također igra ulogu jer tlo, prema knjizi [1], ima negativan temperaturni koeficijent iznosa od  $-0,04 \text{ K}^{-1}$  do  $-0,02 \text{ K}^{-1}$ , a oznaka je  $\alpha_1$  (alfa). Negativna temperaturni koeficijent bi značio da s porastom temperature tla dolazi do opadanja vrijednosti otpornosti tla i obratno. Ta relacije vrijedi samo onda kada nemamo teške vremenske uvjete (suša ili jako niske temperature).

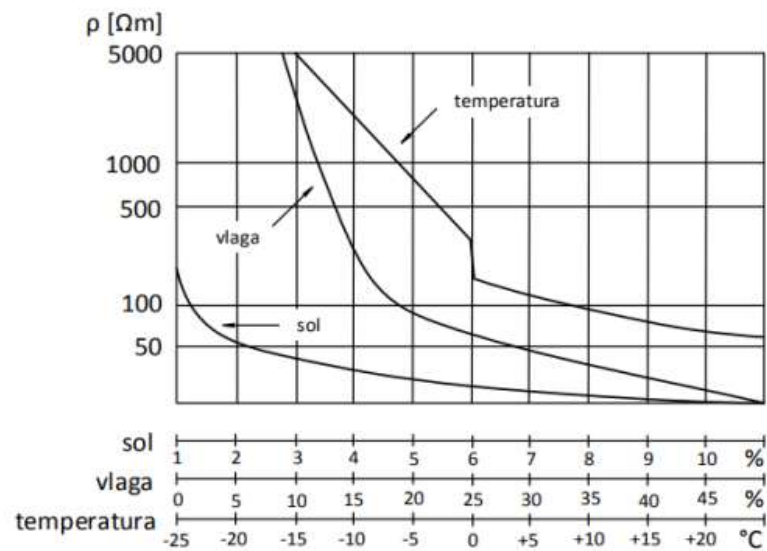
Istraživanja su pokazala da kod uzemljivača koji nisu ukopani dublje od 1,5 m razlika između najvećih i najmanjih vrijednosti otpornosti tla, bez utjecaja naglih pljuskova iznosi 60 % [1]. Kod dublje ukopanih uzemljivača, naročito štapnih, ta razlika iznosi samo oko 20 %, prikazano na slici 4.2 [1].



**Slika 4.2.** Prikaz oscilacija otpornosti tla kroz godinu dana [1]

Prema slici 4.2 vidimo da je krivulja oscilacija otpornosti tla sinusoidalnog oblika čiji su tjemeni u veljači (za maksimalnu vrijednost) i u kolovozu (za minimalnu vrijednost). Ta dva tjemena su vrlo bitna jer u tim uvjetima se može desiti da uzemljivač ne obavi dovoljno dobro zadaću prilikom pojave struje kratkog spoja. Kao posljedica se može desiti da se naponi koraka i dodira nalaze unutar nedozvoljenih granica jer je došlo do promjene vrijednosti otpora rasprostiranja koji je direktno vezan uz otpornost tla.

U tablici 4.1 smo prikazali u kojim vrijednostima se otprilike kreću otpornosti tla za pojedine tipove tla. Da bismo bolje razumjeli princip zašto su te vrijednosti tolike moramo znati kako temperatura, sol i vlaga tla utječu na otpornost tla. Slika 4.3 prikazuje utjecaje temperature, soli i vlage koji je određen prema američkom IEEE standardu 80-2000 [10].



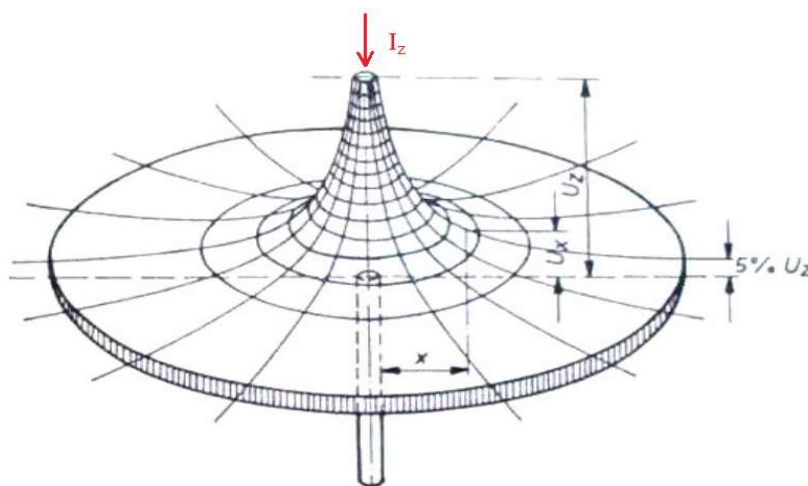
**Slika 4.3** Utjecaj temperature, vlage i soli na otpornost tla [10]

Prema slici 4.3 uočavamo da je prilikom povećanja svih triju parametra dolazi do opadanja otpornosti tla. Ako pogledamo npr. vrijednost za morsku vodu iz tablice 4.1 vidimo vrijednosti od 4  $\Omega\text{m}$  do 40  $\Omega\text{m}$  ima smisla jer je udio vlage jako visok, soli nešto manje i temperatura je većinu vremena  $>15\text{ }^\circ\text{C}$  (za normalne vremenske uvjete).

## 5. PRIKAZ POSLJEDICA KVAROVA

Kvarovi su očekivana pojava koji se dešavaju unutar elektroenergetskog sustava (EES) s kojima se trebamo „boriti” kako ne bi nanijeli prevelike štete za sami EES ili na čovjeka koji se nalazi u neposrednoj blizini unutar ili izvan postrojenja u kojem se dogodio kvar. Kvarovi koji su nama za uzemljenja potrebni su oni koji su posljedica kratkih spojeva u mreži ili udara gromova na dijelove postrojenja. Osim takvih vrsta kvarova, a koji također ovise o uzemljenju su zemljospojni kvarovi s kojima nećemo biti u kontaktu za potrebe prikazivanja ovoga problema.

Kada govorimo o načinu na koji se spomenuti kvarovi unutar EES-a percipiraju prema van za njihovo lakše razumijevanje tada se upotrebljuje tzv. naponski (potencijalni) lijevak koji je prikazan na slici 5.1.



**Slika 5.1** Prikaz naponskoga (potencijalnog) lijevka za cijevasti uzemljivač [11]

Sa slike 5.1 su prikazani napon uzemljivača ( $U_z$ ), napon na točki naponskog lijevka ovisan o udaljenosti „ $x$ ” od uzemljivača ( $U_x$ ). Prolaskom struje kroz uzemljivač u zemlju dolazi pod napon površina zemlje (naravno da to vrijedi i za slojeve ispod površine, ali za zaštitu su važne prilike na površini zemlje), pa između pojedinih točaka vlada razlika potencijala [2].

## 5.1. Napon dodira i napon koraka

Kada je potrebno prikazati na koji način se određuje visina napona koji će direktno utjecati na čovjeka tada govorimo o naponu dodira i naponu koraka. Definicija tih dvaju vrsta napona je objašnjena pod poglavljem 3 dok će se u ovome poglavlju govoriti o prikazu kako se ono određuje.

Ovim poglavljem započinjemo s općenitim prikazivanjem kako izgleda naponski lijevak te kako se on mijenja s udaljenosti od uzemljivača. Oblik i razmak ekvipotencijalnih linija oko uzemljivača ovisi o obliku uzemljivača, o jačini struje i o specifičnom otporu tla, dok je napon uzemljivača jednak umnošku struje kroz uzemljivač i otpora uzemljenja [2]. Napon uzemljivača se računa prema formuli:

$$U_z = I_z \cdot R_z \quad (5.1-1)$$

gdje je:  $U_z$  – napon uzemljivača

$I_z$  – struja kroz uzemljivač (struja kvara)

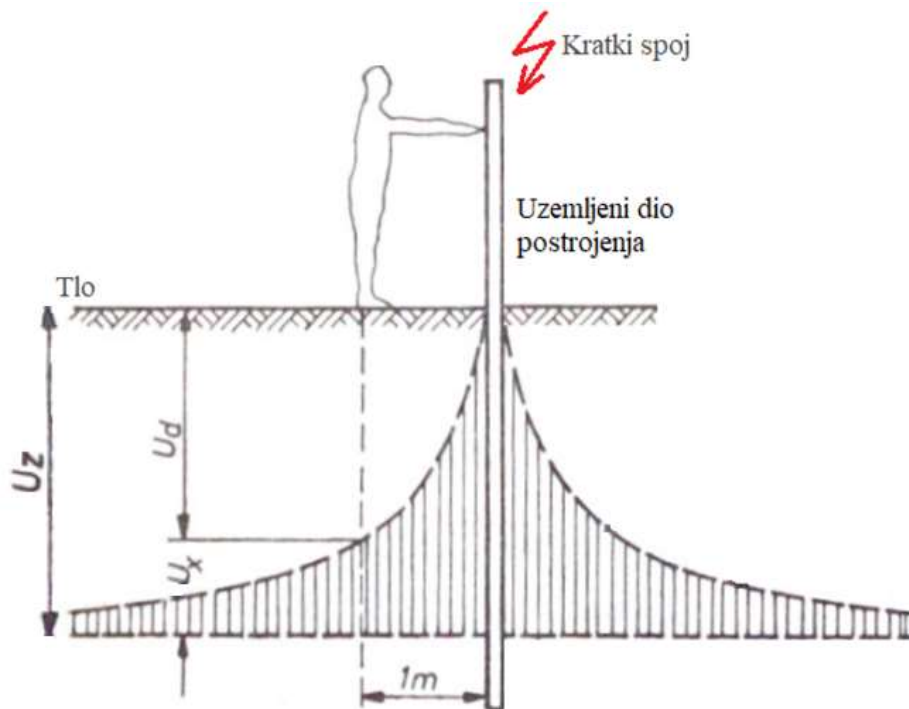
$R_z$  – otpor uzemljenja

Napon uzemljivača  $U_z$  definira se kao razlika potencijala uzemljivača, koji nastaje prolaskom struje kroz otpor uzemljivača ( $V_z = I_z \cdot R_z$ ), i potencijala zanemarive vrijednosti  $V_0$  pri naponskom lijevku raspodjele potencijala [1]. Na slici 5.1 vrijednost  $V_0$  je 5% od vrijednosti potencijala  $V_z$ .

Što je bitno razlikovati, a često dovodi u zabunu je to što se napon (potencijal) uzemljivača i potencijal površine tla ne razlikuju. Treba znati da je vrijednost potencijala uzemljivača uvijek isti duž cijelog oblika uzemljivača, dok je potencijal površine tla promjenjiv u svakoj točki na površini jer ovisi o otporu rasprostiranja (otporu uzemljenja) i to nam prikazuje naponski lijevak. To vrijedi isključivo ako se radi o tipovima kvarovima unutar mreže uslijed čega je došlo do probijanja na uzemljivač (jednofazni kratki spoj), odnosno kvarovi koji su povezani s mrežnom frekvencijom (50 Hz ili 60 Hz). Sada znamo formulu (5.1-1) za određivanja potencijal uzemljivača koja će nam onda poslužiti za određivanje napona dodira i napona koraka.

### 5.1.1. napon dodira

Kada se govori o naponu dodira onda se to odnosi na slučaj kada čovjek dodiruje uzemljene metalne predmete unutar elektroenergetskog postrojenja koji mogu doći pod napon uslijed kratkog spoja ili udara groma. Prikaz napona dodira se vidi iz slike 5.2, a potencijal uzemljivača se smanjuje što se više udaljavamo od uzemljivača i u konačnici se stabilizira (ustaljeno stanje).



*Slika 5.2 Prikaz napona dodira [11]*

Čovjek koji dodiru uzemljeni metalni objekt u postrojenju je prikazan prema slici 5.2 na udaljenosti od 1 m, razlog tome je što je to najgori slučaj koji se može desiti u praksi, a i prosječna duljina ruke je oko 1 m pa ne može biti veći razmak. Da je to najgori slučaj u praksi možemo vidjeti iz sljedeće formule za određivanje vrijednosti napona dodira:

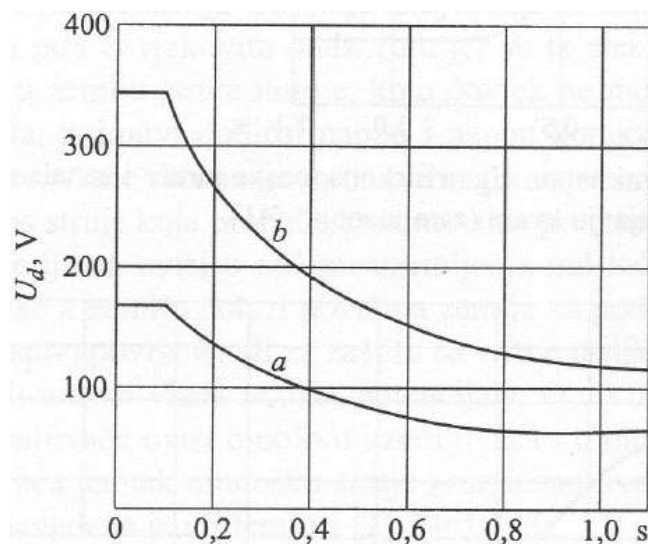
$$U_d = U_z - U_x \quad (5.1.1.-1)$$

gdje je:  $U_d$  – napon dodira

$U_x$  – potencijal na udaljenosti „x” od uzemljivača

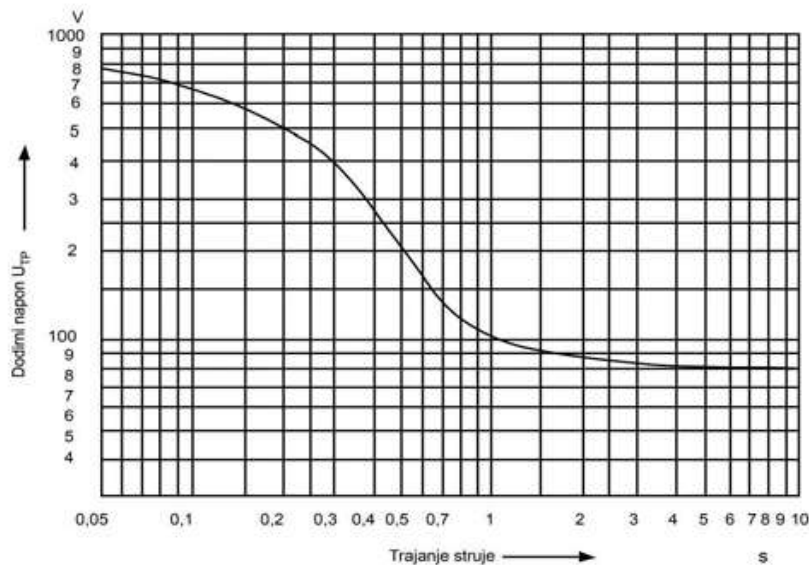
Pošto je napon uzemljivača konstantnog iznosa, vrijednost  $U_d$  ovisi samo o udaljenosti čovjeka od uzemljivača te  $U_d$  raste što je razmak veći pa je samim time i opasnije. Da ne bi bilo zabune, čovjek koji dodiruje metalni objekt dok nema kvara ne predstavlja problem te tada nema napona dodira.

Napon pri kojem čovjek može biti u kontaktu, a da ne dođe do određenih posljedica je određeno brzinom reagiranja zaštite u postrojenju. Na slici 5.3 je vidljiv graf koji prikazuje dopušteni napon dodira u ovisnosti o trajanju zemljospoja. Graf se sastoji od dviju krivulja koje su definirane prema njemačkim propisima, jedan krivulja prikazuje dozvoljeni napon dodira unutar postrojenja (krivulja b), a druga prikazuje napon dodira izvan postrojenja (krivulja a) [2].



**Slika 5.3** Graf dopuštenog napona dodira [2]

Napon dodira je definiran normom koja se na području hrvatske nalazi pod HRN HD 637 S1 [12]. Dopušteni trajni dodirni napon unutar električnih postrojenja iznosi 50 V, a na nadzemnim vodovima s metalnom konstrukcijom stupova, trajno dopušteni dodirni napon iznosi 25 V [12]. Pošto su u visokonaponskim postrojenjima zaštite vrlo brze (ispod 1s je vremensko zatezanje) tako su dopušteni i veći naponi dodira i u tome slučaju moramo se držati grafa koji je prikazan na slici 5.4.



**Slika 5.4** Graf dopuštenog napona dodira u ovisnosti o vremenu trajanja struje prema normi HRN HD 637 S1 [12]

Vrijednost dopuštenog napona dodira se računa prema [7]:

$$U_{kd} = \frac{(1000 + 1.5 \cdot C_s \cdot \rho_{z1}) \cdot 0.157}{\sqrt{t}} \quad (5.1.1 - 2)$$

gdje je: 1000 – vrijednost otpora ljudskog tijela (1000 Ω)

$C_s$  – redukcijски faktor za korekciju otpora površinskoga sloja

$\rho_{z1}$  – otpornost gornjeg sloja tla

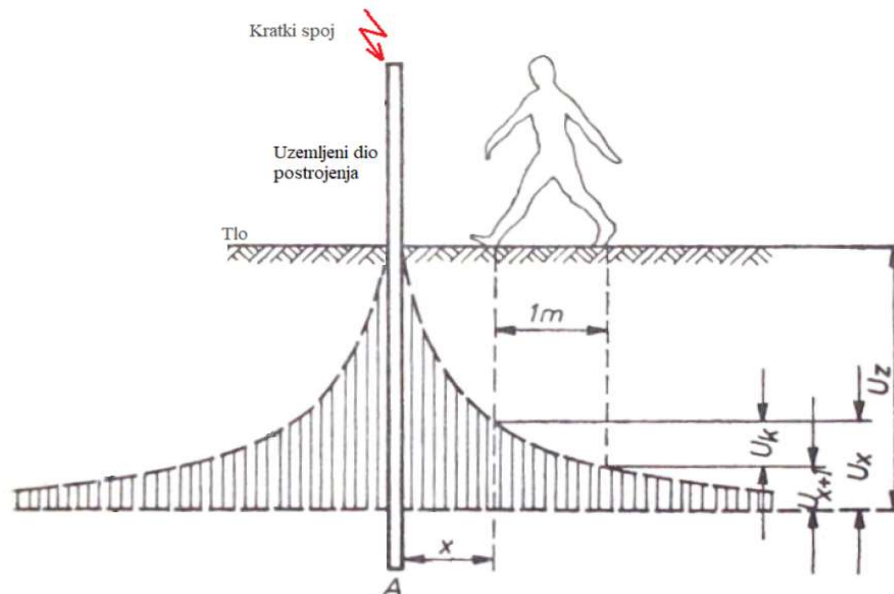
0.157 – faktor za ljudsku masu od 70 kg

$t$  – vrijeme trajanja kratkog spoja

Dopušteni napon dodira služi za određivanje granice napona dodira koje ljudsko tijelo može podnijeti bez posljedica. Dobiveni dopušteni napon dodira treba usporediti s naponom dodira prema formuli (5.1.1 – 1), napon dodira ne smije biti veći od dopuštenoga napona dodira. Koeficijent  $C_s$  ovisi o broju slojeva tla ( $n$ ) i debljini šljunka ( $H$ ), a s porastom debljine šljunka i vrijednost samoga koeficijenta raste [7]. Vrijednost 0.157 predstavlja faktor mase ljudskog tijela pri 70 kg, ako ono iznosi 50 tada je faktor iznosa 0.166.

### 5.1.2. napon koraka

Kada se govori o naponu koraka onda se to odnosi na slučaj kada čovjek hoda na području koje je zahvaćeno naponskim lijevkom unutar elektroenergetskog postrojenja. Napon koraka se odnosi na situacije kada čovjek ne dodiruje niti jedan metalni predmet pa se jedini opasni napon može javiti između njegovih nogu, što je vidljivo na slici 5.5.



**Slika 5.5** Prikaz napona koraka [11]

Čovjek koji se nalazi na slici 5.5 ima udaljenost između svojih nogu od 1m. Ako se malo bolje pogleda i razmisli razmak od 1m između stopala je najgori mogući slučaj i tada napon koraka ima najveću vrijednost, jer što je razmak između nogu manji to je manji napon koraka i on je bezopasniji. Formula po kojoj se određuje vrijednost napona koraka glasi:

$$U_k = U_x - U_{x+1} \quad (5.1.2.-1)$$

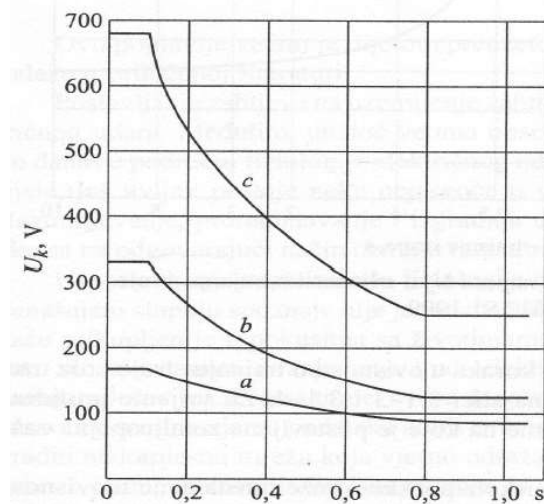
gdje je:  $U_k$  – napon koraka

$U_x$  – potencijal na udaljenosti „x” od uzemljivača

$U_{x+1}$  – potencijal na udaljenosti 1m od prve točke



Neko generalno pravilo koje vrijedi kod inženjera koji se bave uzemljivačkim sustavima glasi da ako je napon dodira u dozvoljenim granicama tada je sigurno i napon koraka u dozvoljenim granicama te ga nije potrebno određivati. To pravilo se pokazalo ispravnim na temelju mnogih mjerenja u praksi, ali ono ne smije biti glavni orijentir nego se tome treba pristupiti profesionalno i držati se normi. Na slici 5.6 je vidljiv graf koji prikazuje dopušteni napon koraka u ovisnosti o trajanju zemljospoja.



Slika 5.6 Graf dopuštenog napona koraka [2]

Graf se sastoji od triju krivulja koje su definirane prema njemačkim propisima, prva krivulja prikazuje dozvoljeni napon koraka unutar postrojenja na otvorenom uz upotrebu izoliranih cipela (krivulja c), druga prikazuje napon koraka unutar i izvan postrojenja ako izuzmemo „krivulju a” (krivulja b) i treća krivulja prikazuje napon koraka izvan postrojenja na prometnim površinama (krivulja a) [2]. Prilikom rada u elektroenergetskim postrojenjima napon koraka također podliježe pravilniku koji se nalazi pod brojem [12] u literaturi.

Vrijednost dopuštenog napona koraka se računa prema [7]:

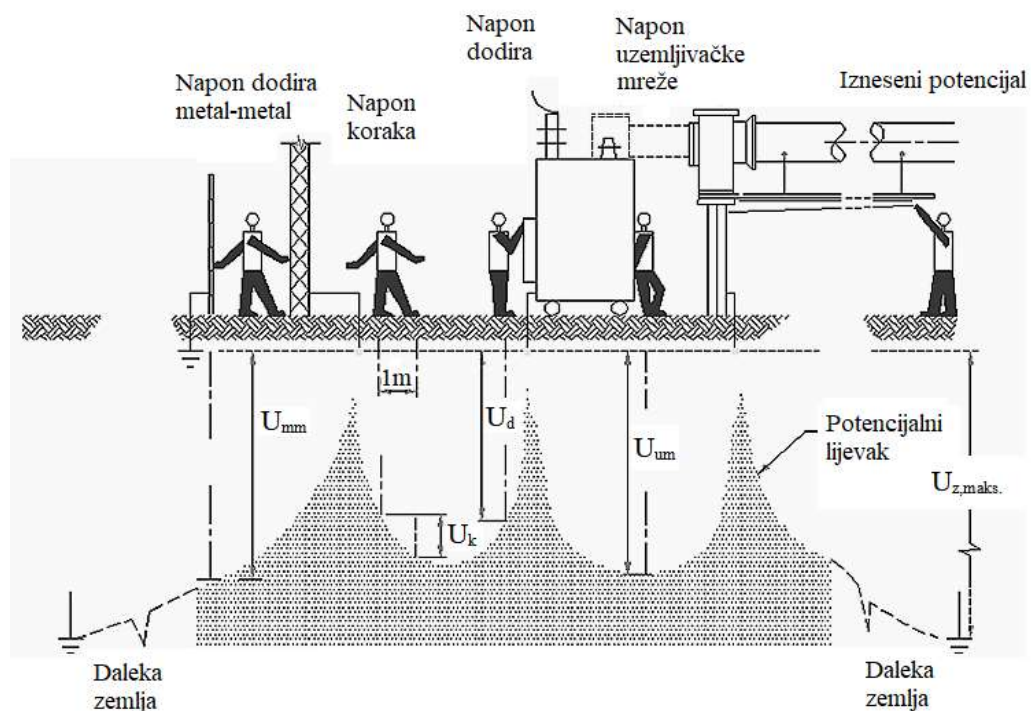
$$U_{dd} = \frac{(1000 + 6 \cdot C_s \cdot \rho_{z1}) \cdot 0.157}{\sqrt{t}} \quad (5.1.2 - 2)$$

Dopušteni napon koraka služi za određivanje granice napona koraka koje ljudsko tijelo može podnijeti bez posljedica. Dobiveni dopušteni napon koraka treba usporediti s naponom koraka prema formuli (5.1.2 – 1), napon koraka ne smije biti veći od dopuštenoga napona koraka.

### 5.1.3. ostali tipovi napona dodira

Prilikom kvara unutar elektroenergetskoga postrojenja može se definirati šest različitih tipova napona, a većina mogu biti opasnih po život. U prijašnjim poglavljima smo obradili tri najbitnija (napon uzemljivača, napon dodira i napon koraka) dok se preostala tri mogu prikazati kao tipovi napona dodira.

Ostali tipovi koji se još definiraju prilikom analiza opasnih napona su: napon dodira metal-metal (*eng. Metal-to-Metal touch voltage*), napon uzemljivačke mreže (*eng. Mesh voltage*) i izneseni potencijal (*eng. Transferred voltage*) te se mogu vidjeti na slici 5.7.



*Slika 5.7 Opasni naponi u trafostanicama [13]*

- Napon dodira metal-metal se odnosi na slučaj kada čovjek dodiruje dva uzemljena metalna objekta koji se nalaze na različitim potencijalima. Kontakt dodirivanjem se može ostvariti kroz ruka-ruka ili ruka-noga, gdje je jedna ruka dodiruje jedan potencijal a druga drugi potencijal. Ovaj napon dodira može biti značajan ukoliko jedan od uzemljenih

objekata nije spojen na uzemljivačku mrežu od trafostanice (npr. metalna ograda oko trafostanice) [13].

- Napon uzemljivačke mreže predstavlja najveći mogući napon dodira unutar uzemljivačke mreže.
- Izneseni potencijal je slučaj kada prilikom jednofaznog kratkog spoja u nekoj trafostanici preko uzemljenog metalnog plašta kabela (uglavnom SN i VN kabele) dolazi do pojave opasnih napona dodira u drugim trafostanicama koje su povezane s onom u kvaru. Metalni plašt ili metalni ekran kabela omogućuje odvođenje dijela struje kvara u ostale trafostanice, čime se smanjuje struja kvara, potencijal uzemljivača, napon dodira i napon koraka na mjestu nastanka kvara [1]. Kako si odredili koliki iznos struje kvara će se iznijeti iz trafostanice to ovisi o učinkovitosti metalnoga plašta kabela koja se određuje iz redukcijskog faktora kabela ( $r_k$ ). Redukcijski faktor kabela se računa kao omjer otpora plašta kabela i ukupnog otpora strujnog kruga pri zemljospoju [1].

Otpornost tla se povećava zbog sezonskih promjena otpornosti tla kao što je sadržaj vlage (suho tlo) ili temperature (smrznuto tlo). U tom slučaju, čak i male količine struje koje teče prema zemlji mogu uzrokovati povišene potencijale unutar objekta [15]. Ako je uzemljenje objekta loše, a uzemljenje transformatora također je slabo, tada će učinci iznesenog potencijala biti gori [15]. Izneseni potencijal se računa prema formuli:

$$U_1 = r_k \cdot I_{1KS} \cdot R_{z1} \quad (5.1.3-1)$$

gdje je:  $U_1$  – napon na početku metalnog plašta kabela u trafostanici nastanka kvara

$r_k$  – redukcijski faktor kabela

$I_{1KS}$  – struja jednofaznog kratkog spoja

$R_{z1}$  – vrijednost otpora uzemljenja u trafostanici nastanka kvara

Iz formule (5.1.3-1) možemo zaključiti da napon  $U_1$  ovisi proporcionalno o  $I_{1KS}$ ,  $r_k$  i  $R_{z1}$ . To bi značilo da je jako bitno kolike vrijednosti očekujemo da ćemo dobiti za pojedini parametar jer s njihovim povećanjem raste i izneseni potencijal iz trafostanice, odnosno napon dodira je onoliki koliki je  $U_1$  ( $U_d = U_1 - V_0 = U_1$ ). Vrijednost redukcijskog faktora kabela ovisi o tipu kabela koji se koristi za povezivanje dvaju trafostanica i vrijednosti struje jednofaznog kratkog

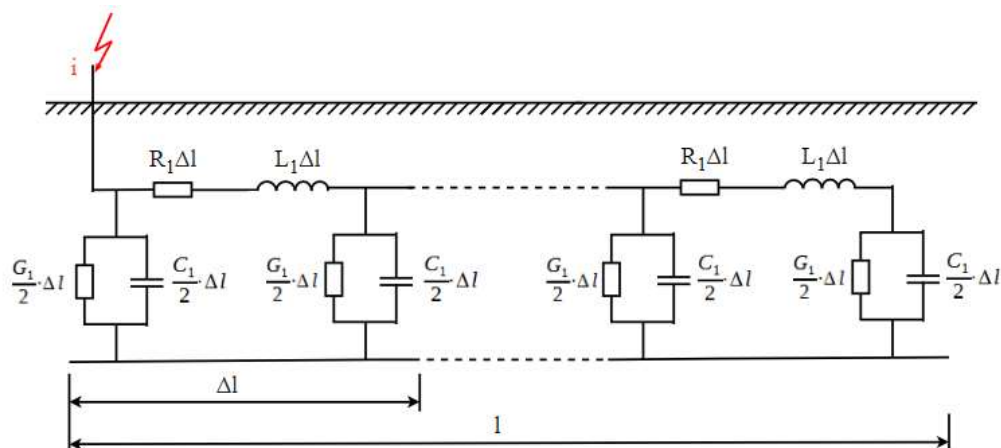
spoja. Vrijednost redukcijuskog faktora se očitava iz grafa za pojedini tip kabela na osnovu ta dva parametara.

Napon na kraju metalnog plašta kabela ( $U_2$ ) se također može odrediti, ali za potrebe diplomskoga rada nije potrebno ići u dubinu problematike iznošenja potencijala nego je cilj samo navesti posljedicu pojave struje na uzemljivačima.

## 5.2. Slučaj udara groma

Udari groma su jedna od vrlo opasnih pojava s pogleda elektroenergetike jer mogu izazvati vrlo velike probleme u elektroenergetskom sustava kao što je ispad trafostanica, zapaljenje opreme ili ako gledamo s gledišta kućanstava onda to može biti uništenje kućanskih aparata unutar objekta.

U ovome diplomskome radu još nije bilo riječi o izgledu modela uzemljivača koji je prikazan na slici 5.8, a još se model naziva lanac  $\pi$  četveropola. Razlog tome je što se baziralo na kratke spojeve unutar mreže, a to znači kvarovi pri frekvenciji od 50 Hz. Kada je riječ o 50 Hz tada uzemljivač to „gleda” kao da se radi od istosmjernoj struji.



**Slika 5.8** Nadomjesna shema lanac  $\pi$  četveropola

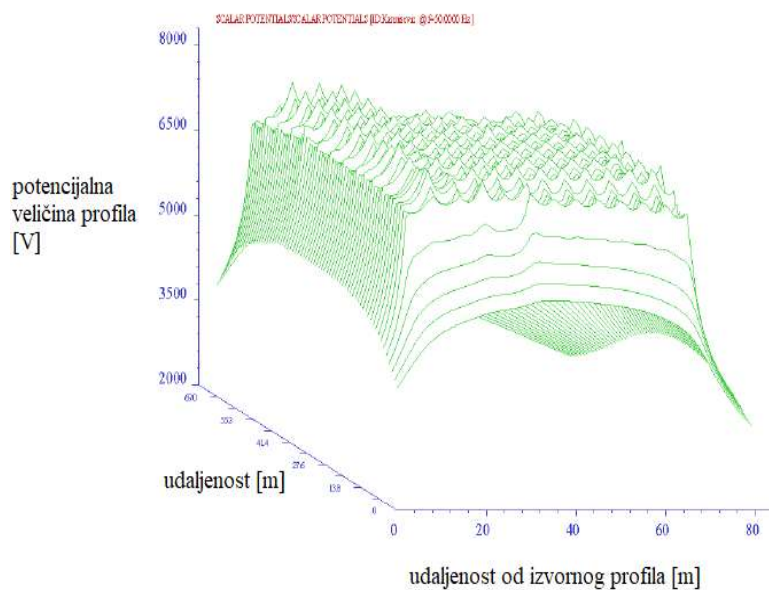
Kada govorimo o terminologiji koja se primjenjuje kod udara grom tada se uvode pojmovi kao što je impulsni otpor, impulsni koeficijent, aktivna duljina uzemljivača. Impulsni

otpor se označava kao  $R_i$  te je mjerodavan za odvođenje struje munje koja ima oblik kratkog impulsa [1]. Impulsni koeficijent ( $\alpha_i$ ) predstavlja omjer impulsne impedancije ( $Z_i$ ) i otpora uzemljenja ( $R_z$ ). Impulsna impedancija se određuje kod kompliciraniji uzemljivačkih sustava jer treba uzeti u obzir L i C, dok kod jednostavnih, kao štapni uzemljivači, je impulsni otpor sasvim dovoljan. Aktivna duljina uzemljivača ( $l_A$ ) određuje do koje duljine uzemljivača struja može doći te nastaviti daljnje rasprostiranje prema okolnom tlu. Za slučaj kada imamo kvarove niske frekvencije (npr. 50 Hz) tada je aktivna duljina uzemljivača veća od duljine samog uzemljivača ( $l_A > l$ ) i tada vrijedi pravilo da je  $Z_i = R_z$ , a to znači  $\alpha_i = 1$  [1].

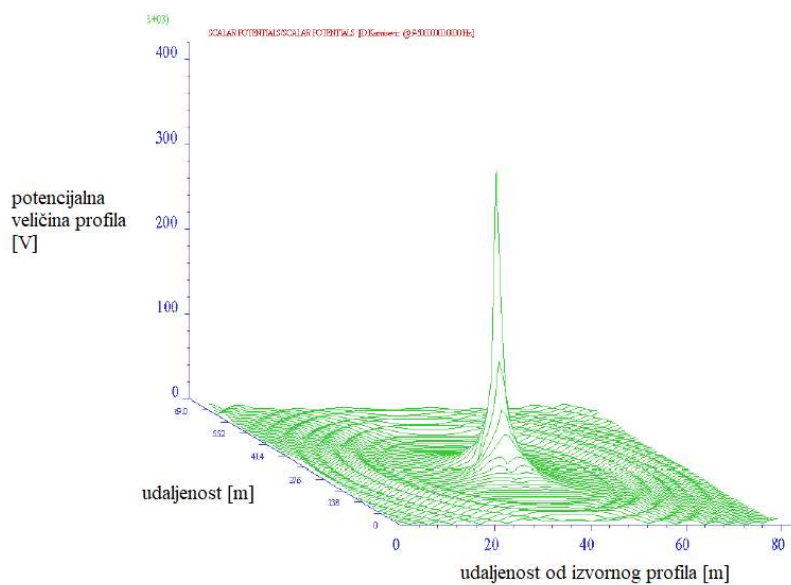
Pri odvođenju struje atmosferskih pražnjenja (visokofrekvencijska pojava) dolazi do izražaja induktivnost komponenata iz kojih se sastoji uzemljivački sustav te se u tom slučaju mora govoriti o impedanciji uzemljivačkog sustava [7]. Bitno je navesti pojam induktivnost komponenata jer prema slici 5.8 uzduž nadomjesnog modela uzemljivača se nalaze komponente R (otpor) i  $X_L$  (induktivna reaktancija), a odvođenje u okolici tla se modelira preko paralelnih grana s komponentama G (odvod) i  $X_C$  (kapacitivna reaktancija). Induktivna reaktancija se računa preko formule  $X_L = 2\pi f \cdot L$ , a kako se radi o visokofrekvencijskoj pojavi (u MHz), vrijednost  $X_L$  postaje dominantan u odnosu na otpor R. U slučaju paralelne grane je suprotno, dolazi do dominantnog odvoda G u odnosu na C jer imamo velik oblik i površinu uzemljivača [1]. Stoga radi pojednostavljenja slike 5.8 može se nacrtati i samo s L i G komponentom.

Induktivitet uzemljivača fizikalno označava magnetski tok oko uzemljivača, onemogućuje jednako otjecanje struje s metalnog vodiča po njegovoj cijeloj duljini [1]. Zato za posljedicu se događa da prilikom udara munje struja ne može proći cijelom duljinom uzemljivača nego se zadržava pri vrhu površine tla, to se najbolje vidi na primjeru sa slike 5.10.

Razlika između raspodjele potencijala tla kada je frekvencija 50 Hz i kada je 5 MHz se najbolje vide na sljedećim primjerima, slika 5.9 i slika 5.10, gdje je za pobudu uzemljivača korištena je struja  $I_z = 10$  kA,  $R_z = 0,78446 \Omega$  [14].



**Slika 5.9** Potencijal zemljišta pri frekvenciji  $f = 50$  Hz za slučaj udara munje u sredinu uzemljivačke mreže pri otpornosti tla  $\rho = 100 \Omega\text{m}$  [14]



**Slika 5.10** Potencijal zemljišta pri frekvenciji  $f = 5$  MHz za slučaj udara munje u sredinu uzemljivačke mreže pri otpornosti tla  $\rho = 100 \Omega\text{m}$  [14]

## 6. TIPIČNE GEOMETRIJE UZEMLJIVAČA

U ovom poglavlju će se navesti podjela uzemljivača koji se najčešće primjenjuju u praksi. Geometrije (oblici) uzemljivača koji se često primjenjuju u praksi su: štapni, trakasti, prstenasti i mrežasti te će se svaki posebno obraditi u ovome poglavlju. S obzirom na oblik uzemljivača, svaki ima drugačiji način izvođenja formule za dobivanje otpora uzemljenja uzemljivača i drugačiji način polaganja u tlo. Da bi se došlo do potrebnih formula za otpore uzemljenja uzemljivača potrebno je poznavati metodu odlikavanja. U toj metodi se polazi od pretpostavke da svaki uzemljivač najprije moramo zrcaliti (odslikati) u odnosu na horizontalni položaj tla, a detaljni izvodi formula su opisani u literaturama [1] i [2]. U ovome radu se neće baviti izvođenjem formula za svaki tip uzemljivača zasebno.

### 6.1. Štapni uzemljivač

Štapni uzemljivač je tip uzemljivača česte primjene u praksi. Razlog tome je što se oni jednostavno polažu u tlo i ne zahtijevaju nikakve dodatne investicije za iskapanja tla jer se način polaganja izvodi s mehaničkim udarcima na strani di se nalazi zatezna pločica, vidljivo na slici 6.1. Njegova primjena se upotrebljava dosta često kod obiteljskih kuća za potrebe izvođenja TN-C-S tipa NN instalacija, gdje se nul vodič u KPMO-u (kućni priključni montažni ormarić) kratko spaja na štapni uzemljivač. Ostala primjena mu je kod uzemljenja trafostanica gdje se u nekim slučajevima i njih nekoliko desetaka spaja na mrežasti uzemljivač radi oblikovanja potencijalnog lijevka sa svrhom smanjenja otpora rasprostiranja.



*Slika 6.1 Štapni FeZn uzemljivač [16]*

Na slici 6.1 je prikazan samo jedan od tipova profila (X profil) poprečnog presjeka štapnoga uzemljivača. Izvedba profila može biti L profil (kutni), O profil (cjevasti), U profil, T profil. Svi profili mogu biti sačinjeni od pocinčanog čelika (FeZn) najčešće, bakra (Cu) ili od pocinčanog bakra. Prema hrvatskoj normi HD 637 S1:1999 dopušteni su štapni uzemljivači najmanjih dimenzija: čelična vruće pocinčana cijev promjera 25 mm debljine stijenke 2 mm, okrugla šipka vruće pocinčana promjera 16 mm, okrugla šipka s ekstrudiranim bakrenom prevlakom promjera 15 mm, bakrena cijev promjera 20 mm debljine stijenke 2 mm [1].

Za potrebe izračuna otpora uzemljenja štapnoga uzemljivača upotrebljava se formula [10]:

$$R_{z,s} = \frac{\rho_z}{2\pi l} \cdot \left( \ln\left(\frac{8l}{d}\right) - 1 \right) \quad (6.1-1)$$

Formula 6.1-1 se dobije preko metode odslikavanja za štapni uzemljivač čiji je vrh ukopan u ravnini s tlom. Takav štapni uzemljivač nije preporučljivo upotrebljaviti u praksi zbog smrzavanja tla tijekom zimskog perioda, stoga je u tome slučaju puno bolje upotrebljavati formulu 6.1-2. Nova formula daje točniji rezultat otpora uzemljenja jer se ona odnosi na slučaj kada je štapni uzemljivač ukopan na određenu dubinu, prikazano na slici 6.2.

$$R_{z,s} = \frac{\rho_z}{2\pi l} \cdot \left[ \ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{4t_h + l}{4t_h - l}\right) \right] \quad (6.1-2)$$

$$t_h = t + \frac{1}{2}l \quad (6.1-3)$$

gdje je:  $R_{z,s}$  – Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača

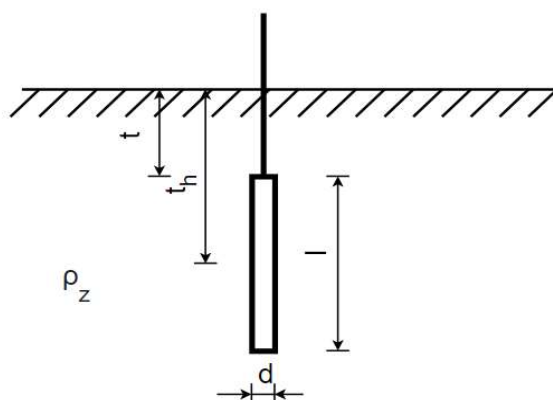
$l$  – duljina štapnog uzemljivača

$d$  – promjer štapnog uzemljivača

$t$  – dubina od površine zemlje do gornjeg ruba štapnog uzemljivača

$t_h$  – dubina od površine zemlje do polovice štapnog uzemljivača

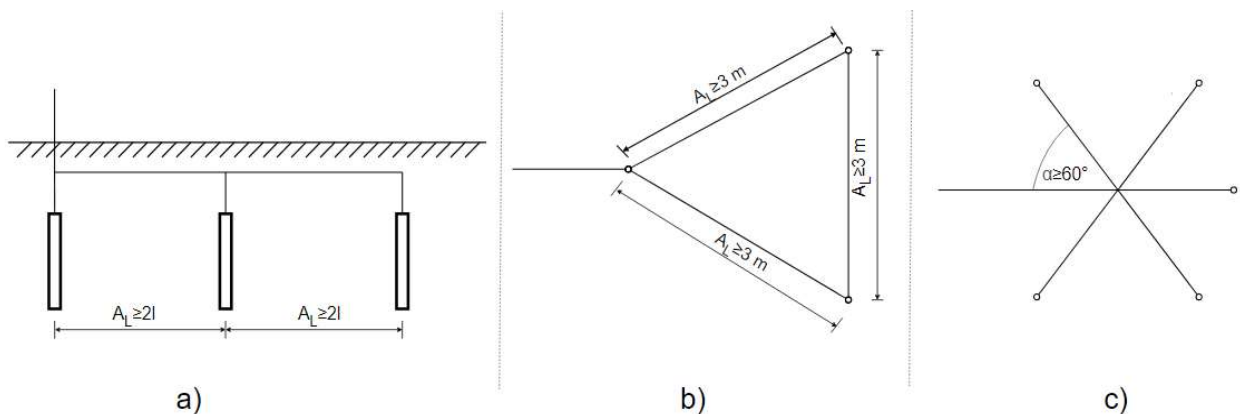




*Slika 6.2 Prikaz ukopanog štapnog uzemljivača*

Ukopavanjem štapnoga uzemljivača na određenu dubinu se rješavaju problemi smrzavanja tla, no međutim i dalje ostaje potencijalni problem koji se nije toliko značajno promijenio, a to je vrijednost otpora uzemljenja. Kao što je već navedeno u drugom poglavlju na otpor uzemljenja također utječu vremenske prilike i sastav tla. Štapni uzemljivači koji se ugrađuju za potrebe TN-C-S sustava su obično duljina od 1 m do 2,5 m, kada bi pogledali katalog od nekih dobavljača uzemljivačke opreme kao što je [18]. Ta duljina može biti varijabilna ovisno o našim potrebama s ciljem smanjenja otpora uzemljenja ili izbjegavanjem utjecaja specifičnog otpora tla na vrijednost otpora uzemljenja. Tek na dubini od 3 m ispod površine specifični otpor zemlje postaje konstantniji i manje ovisan o atmosferskim prilikama [2]. Kada to znamo onda u situacijama gdje nam je vrlo bitno da je otpor uzemljenja što manji i što manje podležan vremenskim utjecajima (kao što su štapni uzemljivači u velikim trafostanicama) tada idemo na povećanje duljine samih štapnih uzemljivača kako bi zahvatili dublje slojeve tla. Ta duljina može ići i preko 10 m, a na tim dubinama imamo vlažnost zemlje koja je veća nego pri vrhu (znamo da veća vlažnost smanjuje specifično otpor tla, slika 4.3) i još je vlažnost prisutna tijekom cijele godine. Problem koji se javlja kod zabijanja štapnog uzemljivača u veće dubine je otežanost proboja s dubljim slojevima, stoga se tada ide na smanjenje promjera uzemljivača [1]. Manji promjer će blago povisiti otpor uzemljenja (manja kontaktna površina s okolnim tlom), ali će se puno više utjecati na smanjenje otpora uzemljenja s dubinom ukupa.

Sami štapni uzemljivači kada govorimo o načinu spajanja mogu se međusobno povezivati u razne oblike ovisno o potrebama, a oni najčešći su prikazani na slici 6.3. Međusobno povezivanje se u praksi obično provodi s FeZn trakom. Kod svakoga spoja potrebno je osigurati dovoljno površine zemlje za pravilno izvođenje jer kod svakoga spoja je definirano koliko trebaju biti štapovi međusobno razmaknuti. Razmak između štapova je bitan zbog međusobnog utjecaja potencijala prilikom pojave kvara jer što više povećavamo razmak to će otpor uzemljenja biti manji, naravno nakon određenog razmaka otpor uzemljenja se počinje zanemarivo malo smanjivati. Stoga razmak za spoj u liniju treba biti barem 2 puta veći od duljine jednoga štapa, u spoju trokut barem 3 m razmaka, a kod zrakastog spoja kut između štapova je  $60^\circ$ . Spoj u trokut se može primjenjivati kada nema dovoljno površine zemlje (npr. kod pogonskog uzemljenja srednjenaponske trafostanice) za spoj u liniju. Spojevi sa slike 6.3 se rade kada je otpor uzemljenja jednog štapnog uzemljivača prevelik za određeni slučaj pa umjesto da povećavamo njegovu duljinu ide se na međusobno povezivanje više manjih štapnih uzemljivača.



**Slika 6.3** Spoj štapnih uzemljivača: a) u liniju, b) u trokut, c) u zrakasti spoj

Ako imamo samo dva paralelno spojena štapna uzemljivača i ako su udaljeni jedan od drugoga barem dvostruku duljinu jednog od njih, može se približno uzeti da je ukupni otpor uzemljenja jednak otporu njihova paralelnog spoja [1]. U slučaju da ih ima jako puno tada je njihov međusobni utjecaj prevelik i rezultat otpora uzemljenja neće biti točan. Stoga kada ih je puno treba primjenjivati sljedeću formulu:

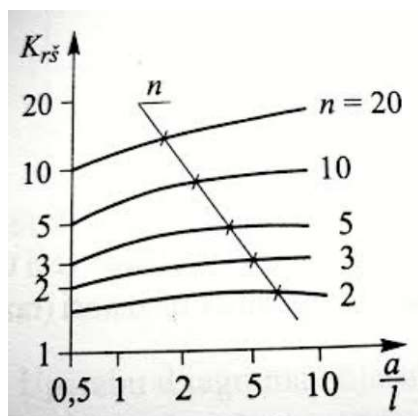
$$R_{z,s} = \frac{R_{z1,s}}{K_{rs}} \quad (6.1-4)$$

gdje je:  $R_{z1,s}$  – otpor uzemljenja jednog štapnog uzemljivača

$K_{rs}$  – redukcijski faktor, ovisi o omjeru  $a/l$

$n$  – broj paralelno spojenih štapnih uzemljivača

$a$  – srednja udaljenost između štapnih uzemljivača



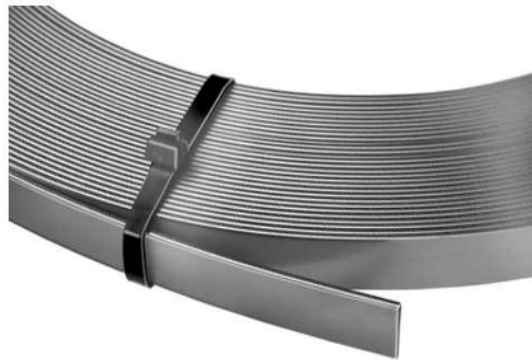
Slika 6.4 Redukcijski faktor  $K_{rs} = f(a/l)$  [1]

## 6.2. Trakasti uzemljivač

Trakasti uzemljivač je tip uzemljivač za koji se može reći da predstavlja bazu svih ostalih tipova geometrija uzemljivača, osim za štapne. To se može jednostavno zaključiti samo na osnovu pregleda njihovih izgleda prilikom podzemnog ili nadzemnog polaganja. Pa tako npr. imamo mrežasti uzemljivač koji je sačinjen od kombinacije vodoravnih i okomitih traka međusobno povezanih u obliku mreže, prstenasti je traka položena u obliku kružnice ili kvadrata, temeljni je traka položena u obliku prstena u betonsko temelje objekta, ili kao traka za potrebe uzemljenja rasvjetnih stupova u nizu. S druge strane traka se može postaviti i van tla kao što je krovšte objekta s ciljem zaštite od udara munje, slika 3.3. Ovdje će se govoriti o traci položenoj u tlo.

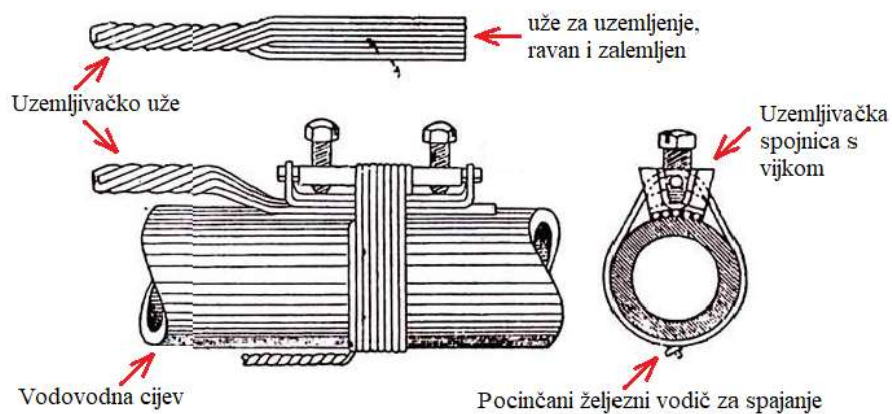
Trakasti uzemljivač se još naziva i horizontalni uzemljivač jer se on polaže u dubinu jednoliko u cijeloj svojoj izvedbi. Uzemljivačka traka je prikazana na slici 6.5. Pošto se polaže na istu dubinu treba jako dobro paziti na zonu smrzavanja jer ukoliko dođe do krive procjene

cijeli će uzemljivač biti okružen sa zaleđenom zemljom, a to bi značilo da on postaje neupotrebljiv. Ta neupotrebljivost (u smislu zaštite) bi dovodilo do opasnih iznosa napona dodira i napona koraka u trenutku pojave kvara jer bi otpornost tla poprimila velike iznose što u konačnici znači i veliki velik otpor uzemljenja. Ukoliko se štapni uzemljivač ukopa preplitko i dođe do smrzavanja tla on će manjim dijelom svoje duljine biti u zamrznutom dijelu tla stoga će mu uzemljivačke karakteristike biti reducirane.



**Slika 6.5** FeZn uzemljivačka traka [17]

Na slici 6.5 je prikazan profil koji se može dosta često sresti u praksi. Osim izvedbe u obliku trake postoje još i oblik užeta i oblik šipke punog presjeka, koji se rjeđe upotrebljavaju. Kao i kod štapnoga uzemljivača, ovdje također postoji izvedba od bakra za slučajeve gdje su agresivnija svojstva tla ili problemi s velikom otpornošću tla. Jedna od mogućih rješenja koja se mogu primjenjivati je i upotreba isključivo pocinčanih vodovodnih cijevi za potrebe uzemljenja objekta [19]. Primjer spajanja se prikazuje na slici 6.6. Prilikom takvog izvođenja treba provjeriti da li takva cijev može zamijeniti uzemljivačku traku u smislu protoka struje kvara i otpora uzemljenja.



**Slika 6.6** Spajanje uzemljivačke žice s vodovodnom cijevi [19]

Prema hrvatskoj normi HD 637 S1:1999 za VN postrojenja dopušteni su trakasti uzemljivači najmanjih dimenzija: čelična vruće pocinčana traka, valjana ili rezana sa zaobljenim rubovima, presjeka  $90 \text{ mm}^2$ , debljine 3 mm, okrugla žica, čelik, vruće pocinčana, promjera 10 mm, bakrena traka presjeka  $50 \text{ mm}^2$ , debljine 2 mm, bakreno uže  $25 \text{ mm}^2$ , bakreno pokositreno uže presjeka  $25 \text{ mm}^2$  [1].

Formula koja se upotrebljava za određivanje otpora uzemljenja uzemljivačke trake ukopane uz površinu tla, dubina  $h=0$ :

$$R_{z,tr} = \frac{\rho_z}{\pi l} \cdot \left( \ln \left( \frac{4l}{d} \right) - 1 \right) \quad (6.2-1)$$

Formula 6.2-1 se dobije preko metode odslikavanja. Pošto se radi o teorijskom izvodu, a i takav uzemljivač ne bi koristio ničemu, ne možemo ga upotrijebiti za stvarni slučaj kada je traka ukopana na određenu dubinu. Za ukapanje u dubinu se upotrebljava formula:

$$R_{z,tr} = \frac{\rho_z \cdot K_p}{2 \pi l} \cdot \left[ \ln \left( \frac{2l}{d} \right) + \ln \left( \frac{l}{2h} \right) \right] = \frac{\rho_z \cdot K_p}{2 \pi l} \cdot \ln \left( \frac{l^2}{d \cdot h} \right) \quad (6.2-2)$$

gdje je:  $K_p$  – korekcijski faktor; očitava se iz tablice 4.2

$l$  – duljina uzemljivačke trake

$d$  – promjer uzemljivačke trake

$R_{z,tr}$  – otpor uzemljenja trakastog uzemljivača

Kod formule 6.2-2 treba biti zadovoljen uvjet da je duljina trake puno veća od dubine njezinog ukopa ( $l \gg h$ ). Kako se u obje formule treba uzeti u obzir i promjer trakastog uzemljivača, gdje se u slučaju okruglog presjeka samo upiše njegov promjer, kod trake treba unijeti nadomjesti promjer koji se računa preko formule za površinu kruga:

$$S = r^2 \pi = \left( \frac{d}{2} \right)^2 \pi = \frac{d^2}{4} \pi \quad (6.2-3)$$

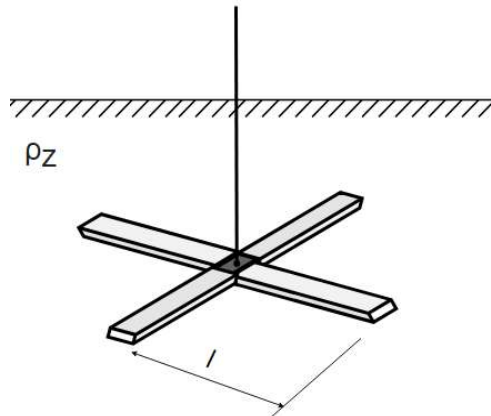
$$d = \sqrt{\frac{4S}{\pi}} \quad (6.2-4)$$

gdje je:  $S$  – površina poprečnog presjeka trake;  $S = a_{tr} \cdot b_{tr}$

$a_{tr}$  – širina trake

$b_{tr}$  – visina trake

Kada se želi smanjiti otpor uzemljenja uporabom trakastog uzemljivača može se primijeniti izvedba s 4 uzemljivača položena pod kutem od  $90^\circ$  kao što je prikazano na slici 6.7. Razlog postavljanja takve izvedbe je i zbog praktičnih razloga jer tada traka ne mora biti jako duga za istu vrijednost otpora uzemljenja [1].



**Slika 6.7** Položene 4 uzemljivačke trake pod kutem od  $90^\circ$

Otpor uzemljenja za izvedbu sa slike 6.5 se računa prema formuli:

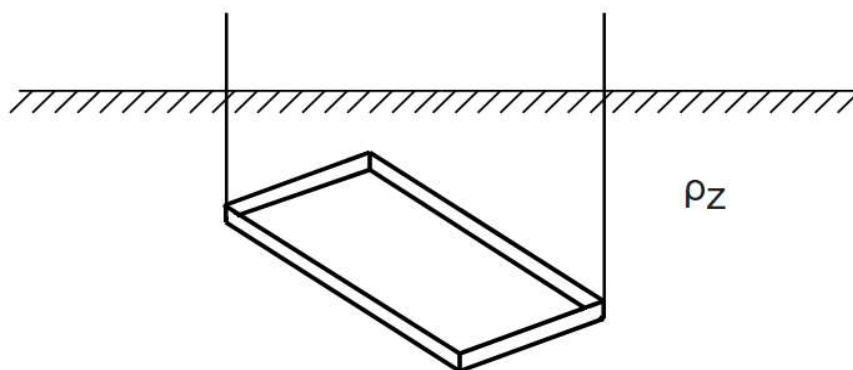
$$R_{z,tr} = \frac{\rho_z}{4 \pi l} \cdot \ln \left( \frac{25l}{r} \right) \quad (6.2-5)$$

gdje je:  $l$  – duljina jedne trake

$r$  – polumjer trakastog uzemljivača

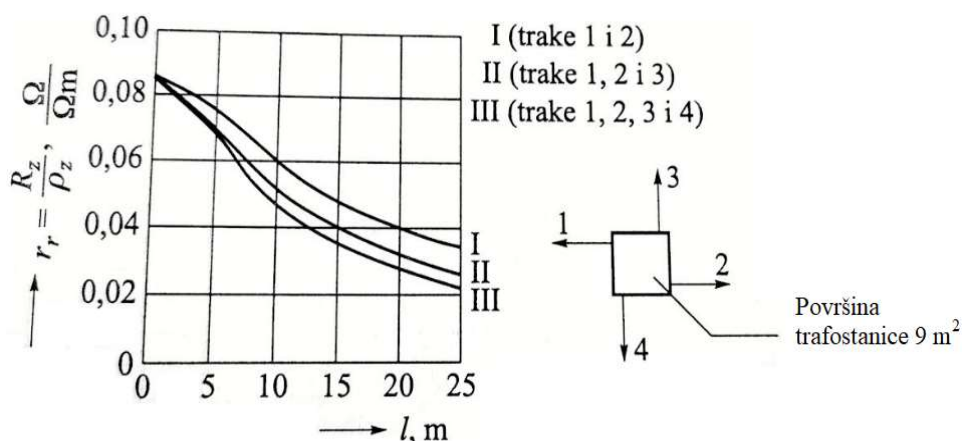
### 6.3. Prstenasti uzemljivač

Kao što se navelo u poglavlju 6.2, prstenasti uzemljivač je izvedenica od trakastog. Razlika između ta dva tipa uzemljivača je obliku postavljanja ispod zemlje bilo to u obliku kružnice ili u obliku četverokuta kao na slici 6.8.



**Slika 6.8** Prikaz prstenastog uzemljivača

Korisni savjet koji je preporučljivo primjenjivati kod prstenastoga tipa uzemljivača je spajanje nekoliko dovoda (vodiča za uzemljenje) na sami prsten, na slici 6.8 su 2 dovoda. Ta primjena se upotrebljava kod armiranobetonskih trafostanica gdje je prstenasti uzemljivač oko trafostanice spojen s temeljnim uzemljivačem na 2 do 4 mjesta (na svaki kut prstena). Razlog takvog spajanja je smanjenje otpora uzemljivača, a još je smanjenje otpora dodatno izraženo s povećanjem broja prstena [1]. Utjecaj na smanjenje otpora uzemljivača može se vidjeti na slici 6.9.



**Slika 6.9** Omjer  $R_z/\rho_z$  uzemljivača TS 10(20)/0,4 kV tipa „tornjić“ za površinu trafostanice od 9 m<sup>2</sup> i sa zrakastim uzemljivačem duljine  $l$  [1]

Za slučaj kada se još povećava i broj prstena tada se dodatno utječe na smanjenje otpora uzemljenja i mogućnost oblikovanja potencijalnog lijevka.

Kod prstenastih uzemljivača kružnog oblika kojima je promjer  $D_p$  veći od 30 m otpor uzemljenja ( $R_{z,pr}$ ) se računa preko formule [1]:

$$R_{z,pr} = \frac{\rho_z}{\pi^2 D_p} \cdot \ln\left(\frac{2\pi D_p}{d}\right) \quad (6.3-1)$$

Ako se pak radi o prstenastom uzemljivaču pravokutnog oblika prikazanim na slici 6.8 tada se upotrebljava formula:

$$R_{z,pr} = \frac{\rho_z}{\pi L} \cdot \ln\left(\frac{1,27 \cdot L}{\sqrt{hd}}\right) \quad (6.3-2)$$

gdje je:  $L$  – opseg četverokutnog uzemljivača

#### 6.4. Mrežasti uzemljivač

Mrežasti uzemljivači se uglavno upotrebljavaju za velike trafostanice na prijenosnom sustavu. Zovu se mrežasti jer se uzemljivačke trake polažu u obliku mreže s većim ili manjim razmacima između traka, odnosno površinama pojedinačnih pravokutnika. Primjer mrežastog uzemljivača se vidi na slici 6.10.



**Slika 6.10** Mrežasti uzemljivač [22]



Kako se mrežasti uzemljivač upotrebljava u trafostanicama na prijenosnim sustavima tada se još često upotrebljava i bakar kao materijal uzemljivača jer je otporniji na utjecaj agresivnosti tla i potreba za jako malom vrijednosti otpora uzemljenja (ispod 1  $\Omega$ ) [7]. Razlog uporabe bakra su visoke vrijednosti struja kratkih spojeva (nekad i preko 10 kA) pa se lakše dolazi do manjih vrijednosti napona uzemljivača, a posljedično i do manjih problema s naponom dodira i koraka jer je otpor uzemljenja mali.



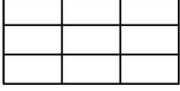

Formmula koja se upotrebljava za proračun otpora uzemljenja mrežastog uzemljivača ( $R_{z, mr}$ ) je:

$$R_{z, mr} = \frac{\rho_z}{2 \pi l} \cdot \left( \ln \left( \frac{l_{mr}^2}{dh} \right) + A \right) \quad (6.4-1)$$

gdje je:  $l_{mr}$  – ukupna duljina vodiča u mrežastom uzemljivaču

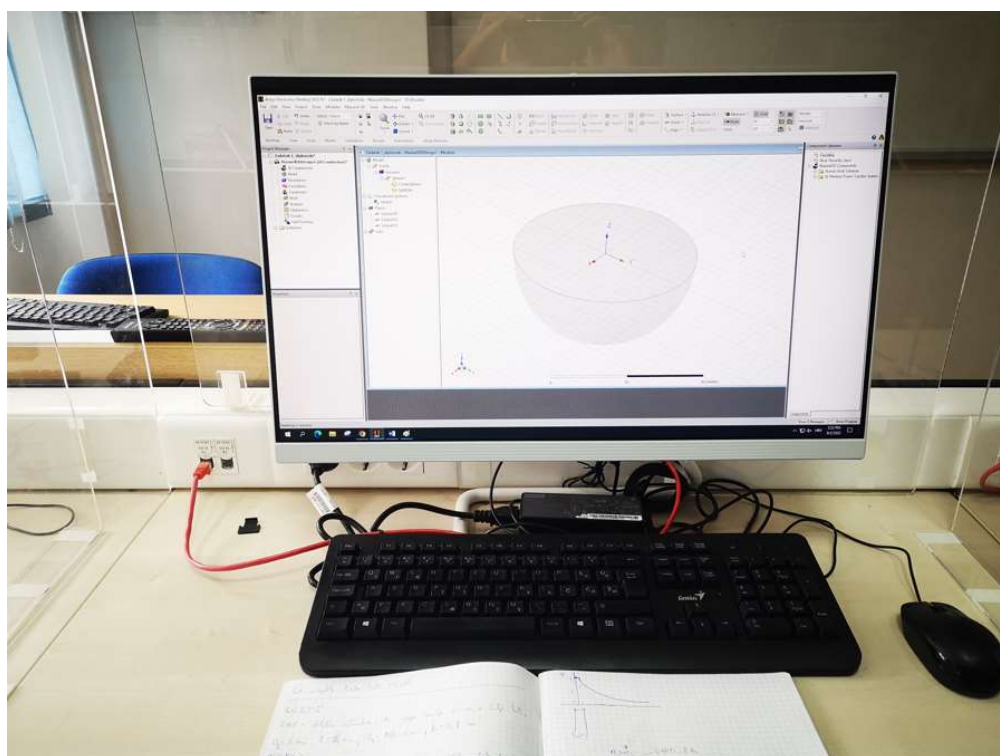
A – koeficijent mrežastog uzemljivača; određuje se iz tablice 6.1

**Tablica 6.1** Koeficijent A

| Izgled<br>uzemljivača   | Koeficijent A                      |      |      |      |      |
|---|------------------------------------|------|------|------|------|
|   | Omjer duža stranica/kraća stranica |      |      |      |      |
|   | 1                                  | 1,5  | 2    | 3    | 4    |
|  | 4,95                               | 5,16 | 5,44 | 6    | 6,52 |
|  | 5,61                               | 5,04 | 4,73 | 4,43 | 4,33 |
|  | 8,55                               | 8,24 | 9,4  | 10,3 | 11,1 |
|  | /                                  | /    | 22,7 | /    | /    |

## 7. ANSYS SIMULACIJA

Za potrebe izvršenja zadatka diplomskoga rada korišten je laboratorij T1-21 na Fakultetu elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Uporabom programa „Ansys Electronics Desktop 2022 R1” izvršena je simulacija štapnog uzemljivača. Kao tip simulatora unutar program korišten je „Ansys Maxwell 3D Design”. Simulacija se obavljala dana 02.09.2022. i dana 05.09.2022. u spomenutom laboratoriju. Simulaciju je obavljao student Karlo Jakopović univ. bacc. ing. el. tech. inf. uz nadležnost mentora Prof. dr. sc. Tomislava Barića. Fotografiju na slici 7.1, kao dokaz obavljanja zadatka, slikao je student Karlo Jakopović dana 02.09.2022.



*Slika 7.1 Prikaz obavljanja zadatka u programu Ansys Electronics Desktop 2022 R1*

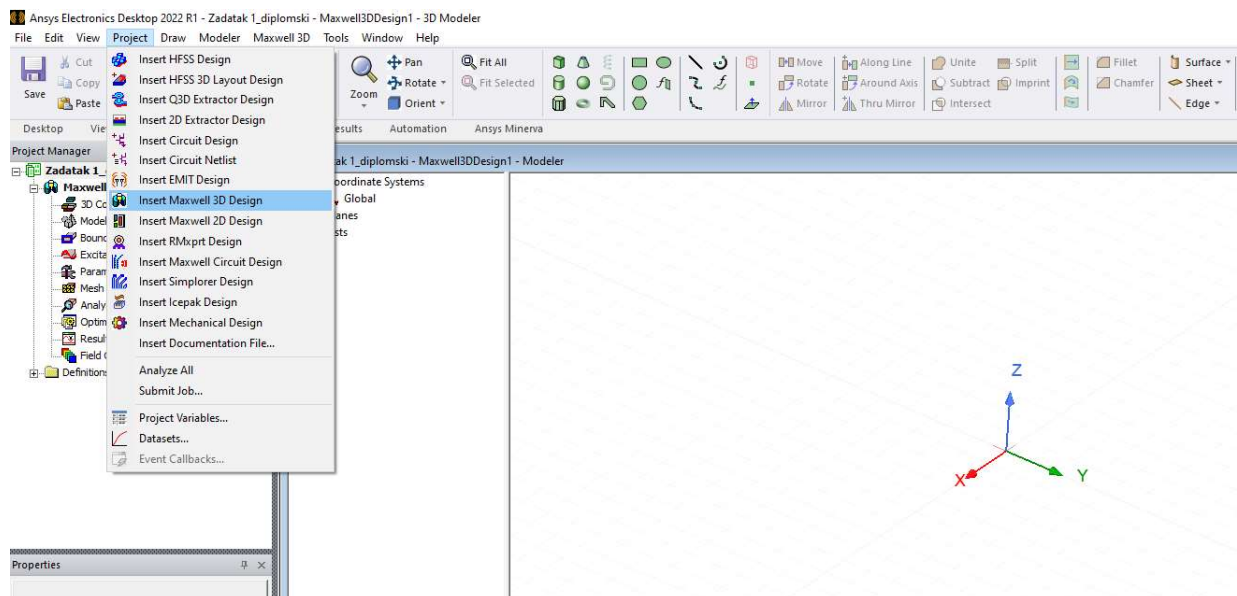
U laboratoriju su obavljene dvije simulacije koje se nalaze u daljnjim stranicama pod imenima potpoglavlja „Zadatak 1” i „Zadatak 2”.

## 7.1. ZADATAK 1.

Potrebno je odrediti otpor uzemljenja i raspodjelu potencijala za štapni uzemljivač koji je ukopan do gornjeg sloja tla u programskom paketu ANSYS Maxwell. Zadani podaci su: promjer štapnog uzemljivača je 5 cm, duljine 2 m, otpornost tla je  $100 \Omega\text{m}$ , materijal uzemljivača je pocinčani čelik, a tlo je oblika polukugle radijusa 20 m.

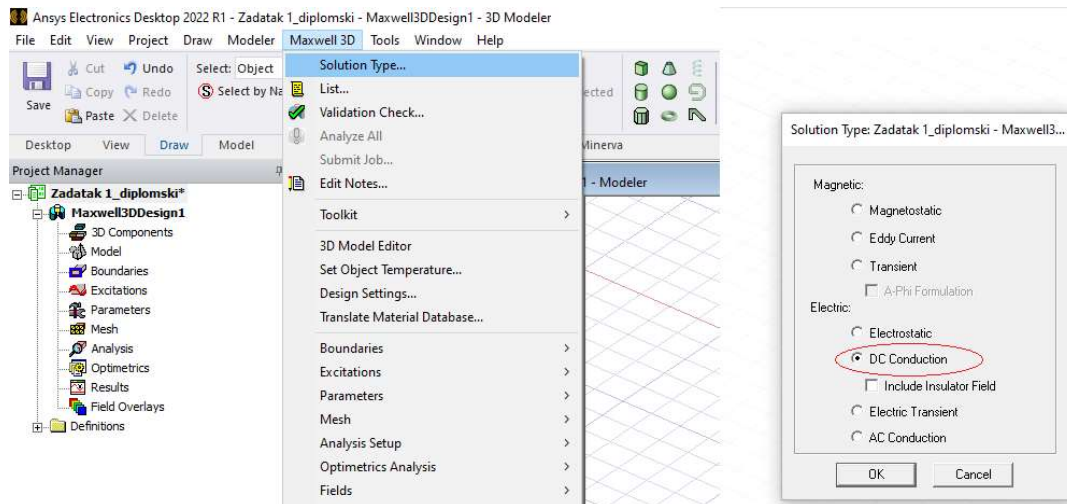
$$\begin{array}{lll} d_s = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m} & l = 2 \text{ m} & \text{FeZn} \\ r_{\text{tlo}} = 20 \text{ m} & \rho_z = 100 \Omega\text{m} & h = 0 \text{ m} \end{array}$$

Simulacija se započinje otvaranjem programa „Ansys Electronics Desktop 2022 R1”. Ovaj programski paket služi za izradu raznih simulacija ovisno o potrebama korisnika, a u našem slučaju to je „Ansys Maxwell 3D Design” kao što se vidi na slici 7.2.



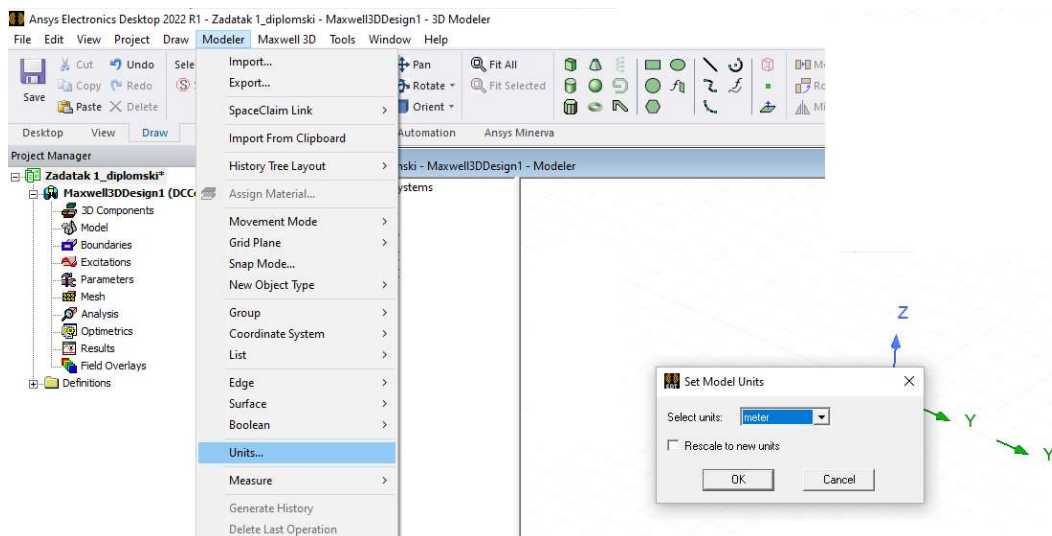
*Slika 7.2 Odabir programskog paketa*

U ovome zadatku će se raditi o tlu kroz koje teče istosmjerna struja. Istosmjerna struja će imati isti efekt na raspodjelu struje unutar tla kao i da smo odabrali izmjeničnu struju s frekvencijom od 50Hz. Stoga odabiremo u postavkama da radimo s DC komponentom struje kao što se vidi na slici 7.3.



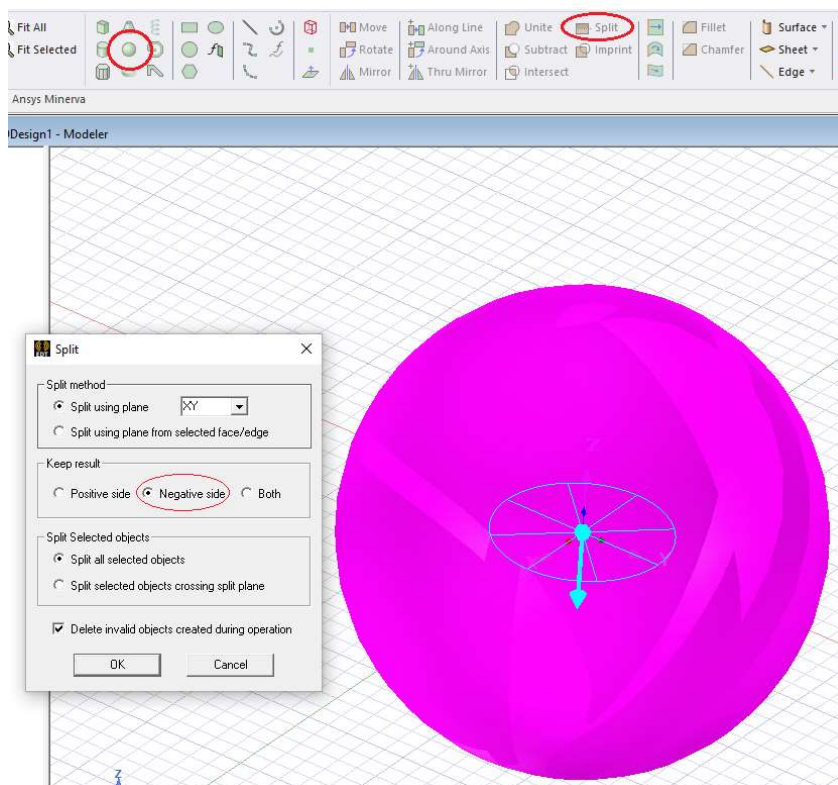
*Slika 7.3 Primjena istosmjerne vodljivosti na objekte*

Program kod svojega pokretanja pretpostavlja da će se koristiti milimetarska skala prilikom dizajniranja modela. Tu skalu se prebacuje u metre preko opcije „Units” kao što prikazano na slici 7.4, iako se neće ništa promijeniti u izvođenju simulacije samo treba paziti kod preračunavanja zadanih parametara modela iz „m” u „mm”.



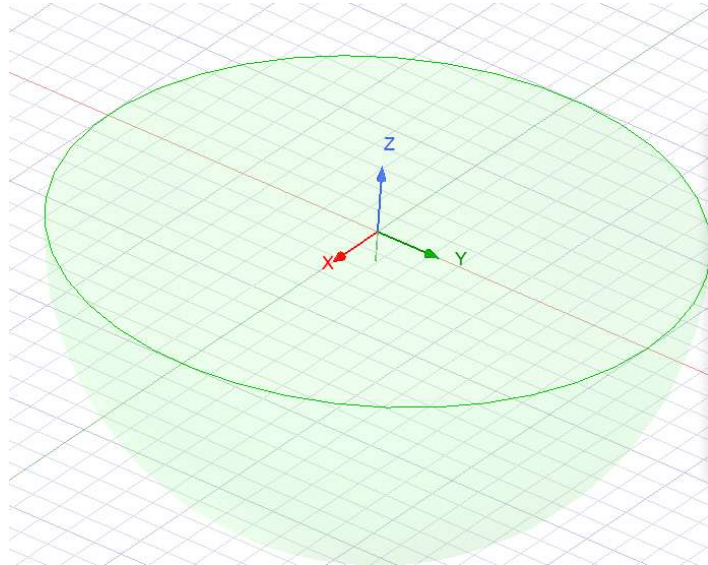
*Slika 7.4 Odabir mjerne jedinici kod crtanja modela*

Nakon postavljanja osnovnih parametara u programu, sada se može početi crtati 3D model prema podacima zadanim u zadatku. Prvo odabiremo kuglu u alatnoj traci koju potom pozicioniramo u ishodište X,Y,Z ravnine. Prema zadatku moramo odrezati gornji dio sfere (kugle) pomoću naredbe „Split“ jer radimo raspodjelu potencijala u tlu, stoga nam je gornji dio kugle nepotreban, prikazano na slici 7.5. Polukugla prezentira tlo u kojemu se odvija raspodjela struje narinute kroz štapni uzemljivač.



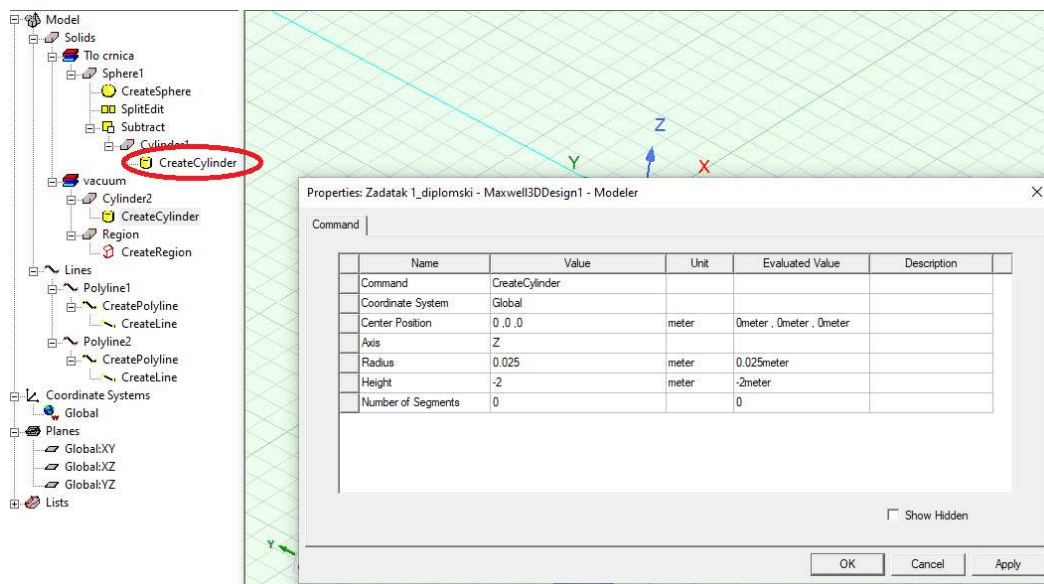
*Slika 7.5 Izrada modela tla preko modela kugle*

Sada je potrebno odrediti dimenzije polukugle, a to se radi pomoću desnog klika miša na „Create Sfere“, odabiremo „Properties“ i upisujemo radijus od 20 m ( $r_{tlo}$ ) s položajem polukugle u koordinatama 0,0,0, a konačan izgleda prikazan je na slici 7.6. Za polukuglu je odabrano svjetlo zelena boja s prozirnosti od 90 % (0.9).



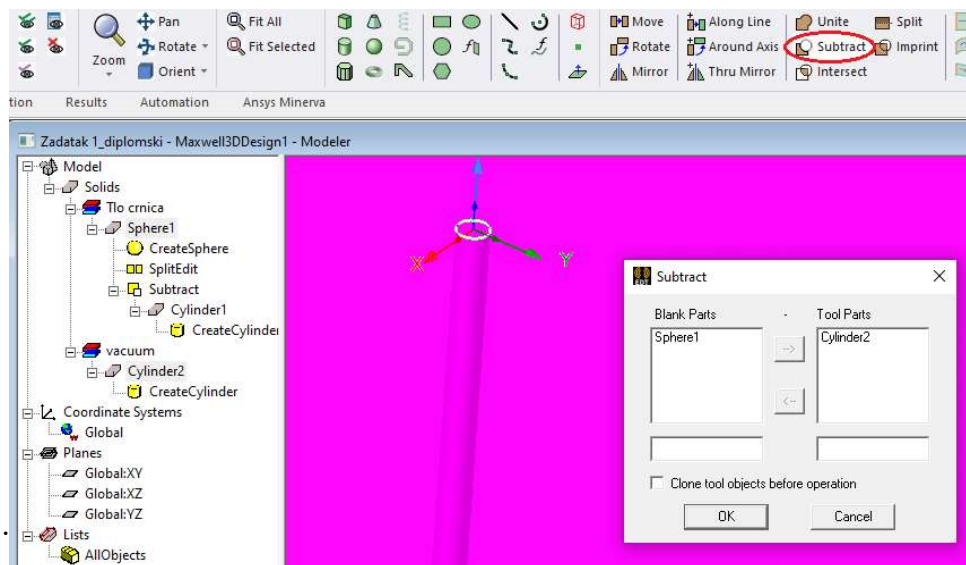
*Slika 7.6 Konačan izgled polukugle*

Sljedeći korak je oduzeti volumen štapnog uzemljivača od volumena polukugle. To se radi na način da odabiremo cilindar koji je istih dimenzija kao štapni uzemljivač. Cilindar se postavljam u ishodište koordinatnog sustava, zatim preko „Create Cylinder“ pa na „Properties“ odabiremo cilindar visine 2 m i radijusa 0.025 m kao što je prikazano na slici 7.7.



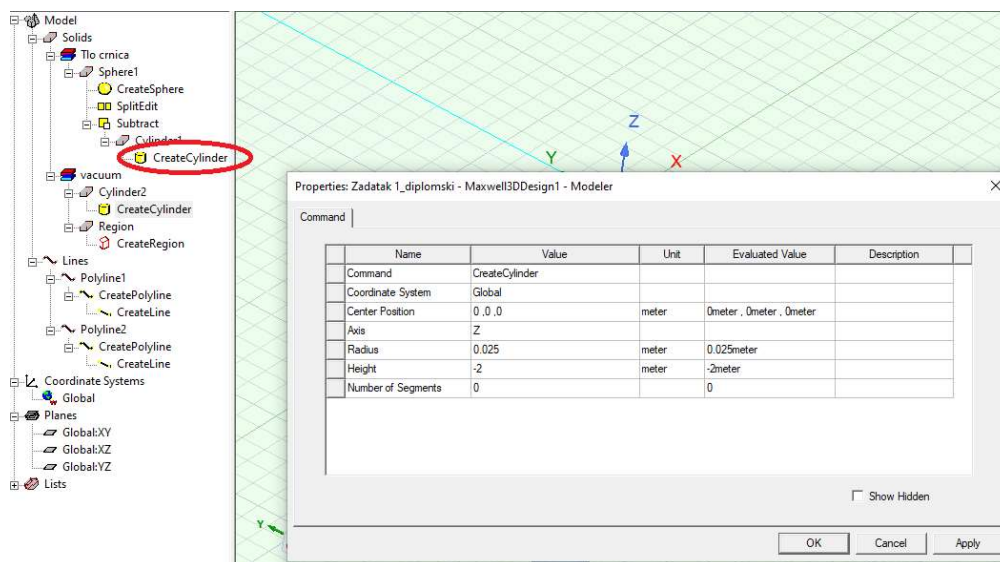
*Slika 7.7 Izrada rupe u polukugli*

Sada treba količinu volumen cilindra oduzeti od volumena sfere. Taj postupak se radi označavanjem cilindra i polukugle te odabir naredbe „subtract“, prikazano na slici 7.8



*Slika 7.8 Izrada rupe za štapni uzemljivač*

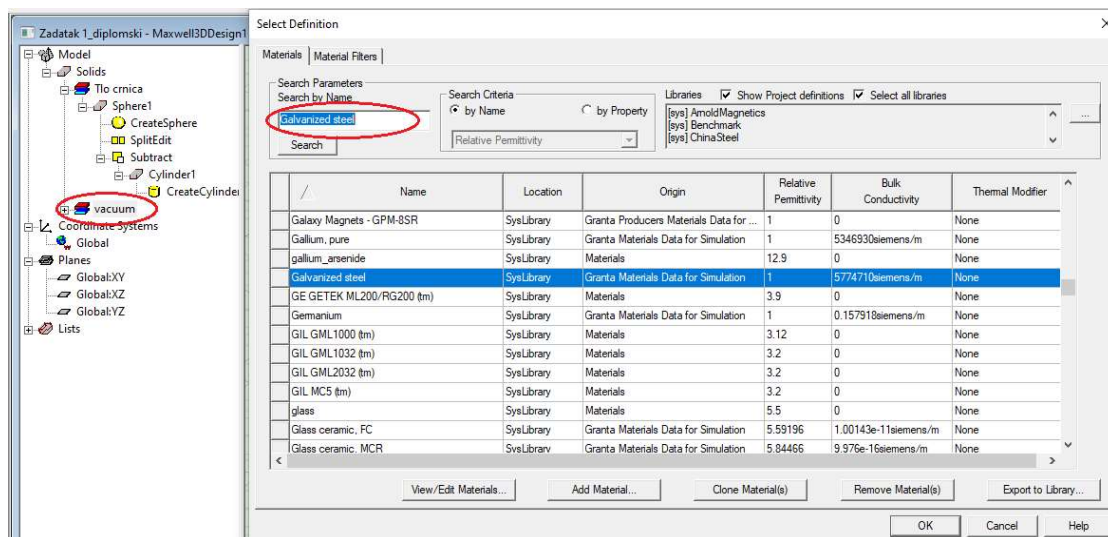
U polukugli se sada nalazi šupljina veličine prošlog cilindra i u tu rupu ubacuje se novi cilindar istih dimenzija koji će predstavljati štapni uzemljivač, prikazano na slici 7.9. Sada su napravljeni svi modeli koji sudjeluju u simulaciji i možemo početi s dodjeljivanjem vrsta materijala.



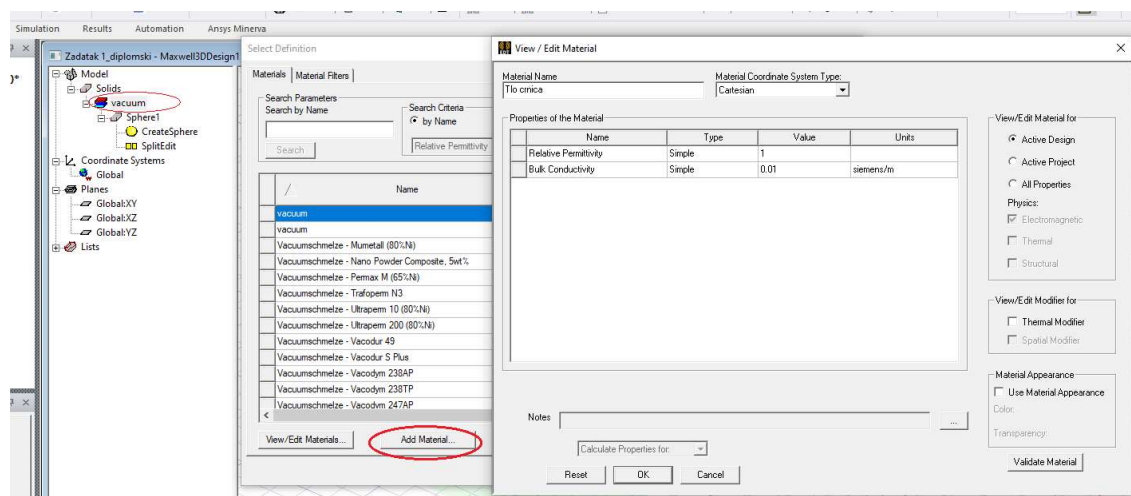
*Slika 7.9 Odabir dimenzija i položaja štapnog uzemljivača*

Štapni uzemljivač je trenutno napravljen od vakuuma, stoga prvo treba promijeniti materijal u pocinčani čelik. Postupak se radi tako da označimo uzemljivač u izborniku s ostalim modelima i desnim klikom odabiremo „Properties” zatim „Assign Material” i preko tražilice se pronade „Galvanized steel”, prikazano kao na slici 7.10. Za boju štapnog uzemljivača je odabrana siva boja.

Materijal polukugle (tla) koji se koristi bit će proizvoljno odabran jer se radi o tlu crnici, a toga nema na popisu materijala. Postupak je isti kao i na slici 7.10 samo što se ovdje odabire „Add Material” kao što se vidi na slici 7.11. Za ime materijala upisuje se „Tlo crnica“, relativna permitivnost je 1 (tlo nema utjecaja na permitivnost), otpornost tla je  $100 \Omega\text{m}$  (iz zadatka) što bi značilo da je vodljivost  $0.01 \text{ S/m}$ .



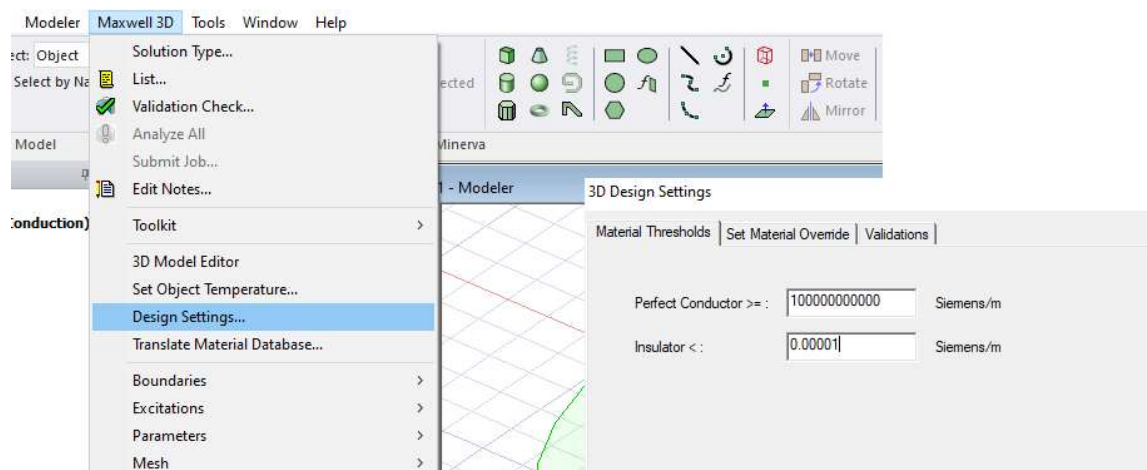
Slika 7.10 Odabir vrste materijala za štapni uzemljivač



Slika 7.11 Odabir vrste materijala za tlo

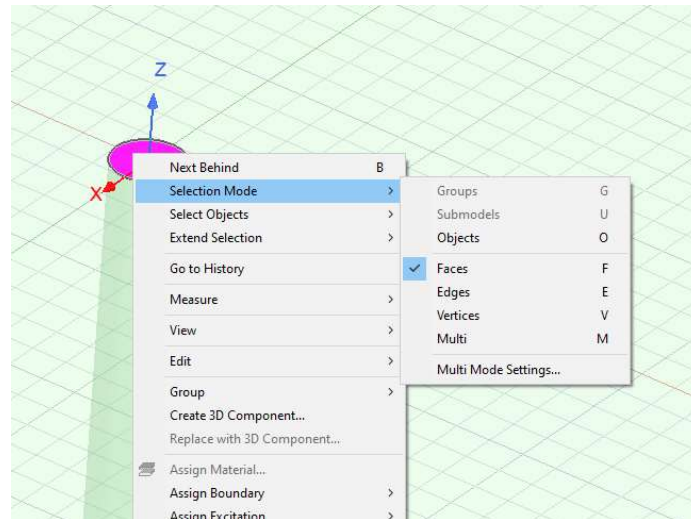


Sada su modelirani svi objekti koji sudjeluju u zadatku i sljedeće što trebamo napraviti je odrediti u programu što je izolator. Za to trebamo otići na „Maxwell 3D“, odabrati „Design settings“ i pod izolator definirati sve vrijednosti vodljivosti čije su vrijednosti su manje od 0.00001 S/m (10 000  $\Omega$ m) će se smatrati izolatorima, prikazano na slici 7.12. Ukoliko se ostavi stara vrijednost za izolator ( $<1$  S/m) simulacija neće moći odraditi zadatak jer je vrijednost vodljivosti tla postavljena na 0.01 S/m pa bi program tlo gledao kao izolator.

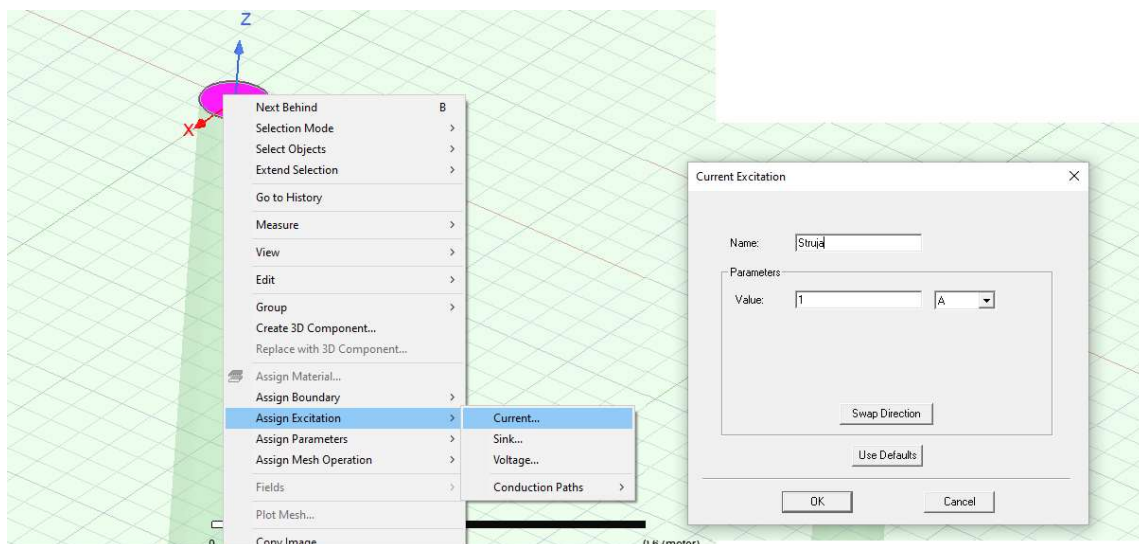


*Slika 7.12 Definiranje vrijednosti vodljivosti za izolator*

Sljedeće što treba odrediti je vrijednost pobude, kao pobuda će se koristiti struja iznosa 1A. Pobuda se određuje na plohu kroz koji će se struja injektirati, a to je gornja baza štapnog uzemljivača (cilindra). Sada treba podesiti da biramo samo plohe pojedinačno, a ne objekte kao cjelinu. To se radi desnim klikom i odabirom „Selection Mode“ i označavamo „Faces“ kako je prikazano na slici 7.13. Na štapnom uzemljivaču odabiremo plohu kroz koju će se vršiti pobuda, a to je gornja baza cilindra (ljubičasto označeno), prikazano na slici 7.13. Sada označavamo gornju bazu desnim klikom miša te odabiremo „Assign Excitation“, ide se na „Current“ i stavlja se vrijednost pobude od 1 A, prikazano na slici 7.14. Smjer struje treba biti okrenuti u smjeru negativne Z osi (struja ide u tlo).



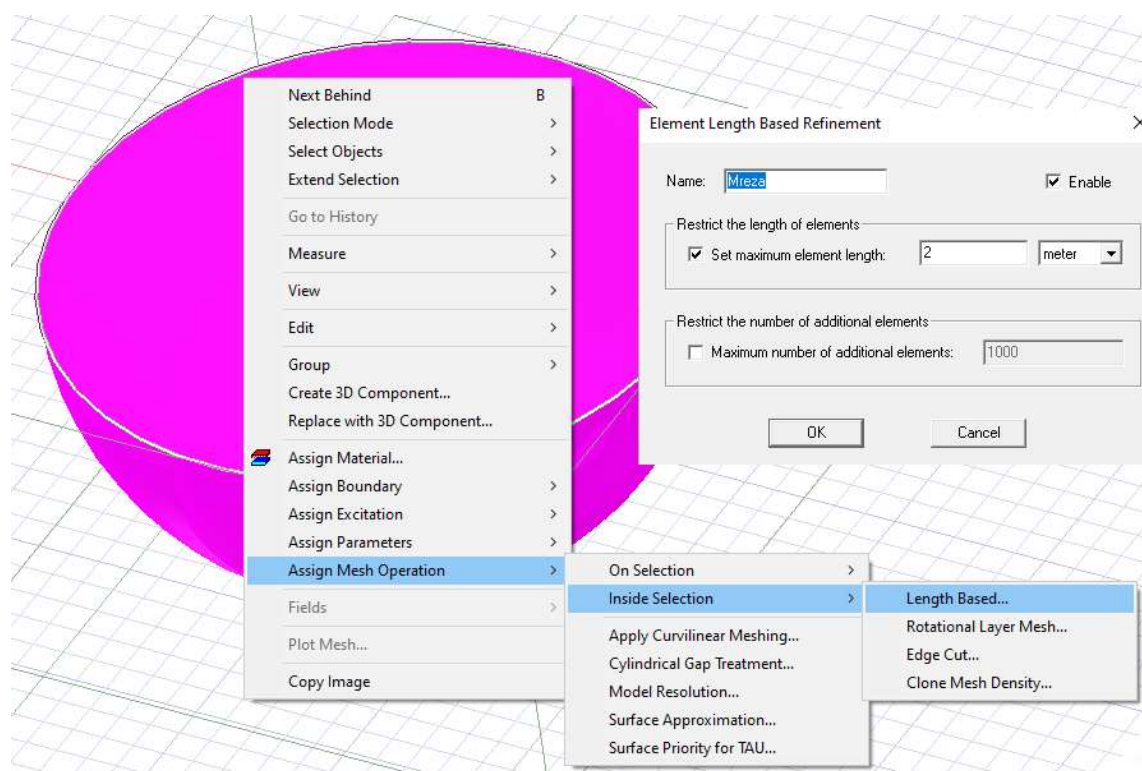
*Slika 7.13* Mogućnost označavanja samo stranica objekata



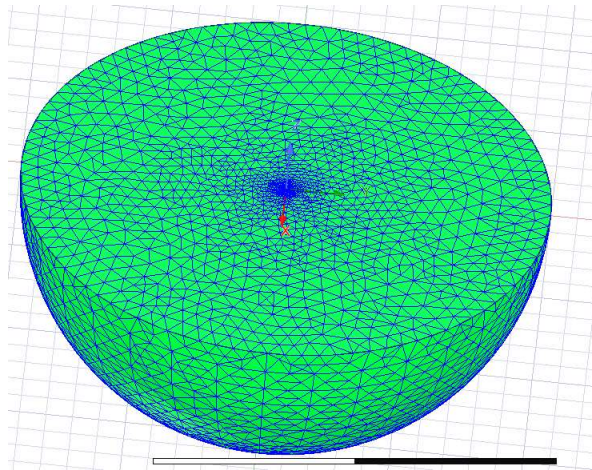
*Slika 7.14* Postavljanje vrijednosti struje pobude na gornjoj bazi cilindra

Kao sljedeća postavka koju još treba odrediti unutar „Assign Excitation” je naredba „Sink”. Naredba „Sink” se postavlja kada je definirana samo strujna pobuda na objektu i da pritom nema naponske pobude (u slučaju da su obje pobude postavljene simulator će izbaciti grešku) [21]. „Sink” osigurava da ukupna struja koja teče kroz vanjsku površinu vodljivog puta je točno nula [21]. Stoga kao „Sink” se u ovome slučaju postavlja kalota polukugle (gornji dio polukugle ne smije biti označen).

Simulacija se izvodi za uzemljivač, a uzemljivač je ispod površine tla kroz koji će poteći struja i stvoriti potencijalni lijevak. Da bi mogli dobiti rezultat simulacije unutar objekta potrebno je odrediti gustoću mreže simulacije. Potrebno je dodijeliti polukugli i cilindru naredbu „Mesh” za unutar objekta po dužini samog objekta. Naredba „Mesh” služi kada se očekuje da će geometrija imati značajna izobličenja, teško je održati kvalitetu mreže jer se deformira i izobličuje [20]. U tim je situacijama korisno ponovno ispraviti mrežu kako bi se izbjegle iskrivljene mreže [20]. Označavaju se cilindar i polukugla odabire se „Assign Mesh Operation“ zatim „Inside Selection“ i „Length Based“ koji iznosi 2 m, kao prema slici 7.15. 2 m znači da duljina jednog poligona u mreži ne smije prijeći 2 m. Konačan izgled mreže je na slici 7.16.

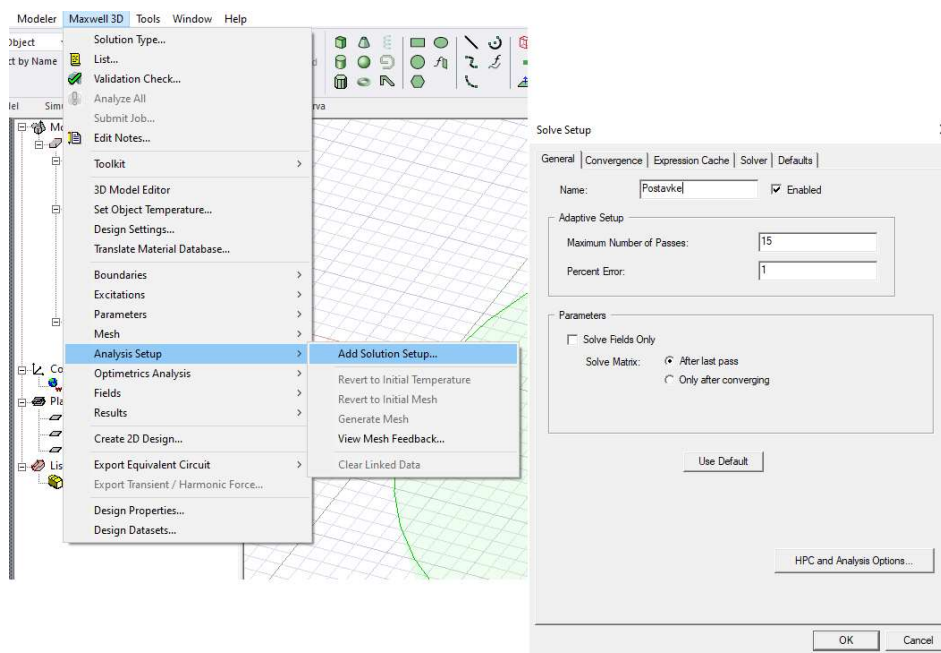


*Slika 7.15 Odabir „mesh” naredbe i postavke parametara mreže*



*Slika 7.16 Konačan izgled mreže*

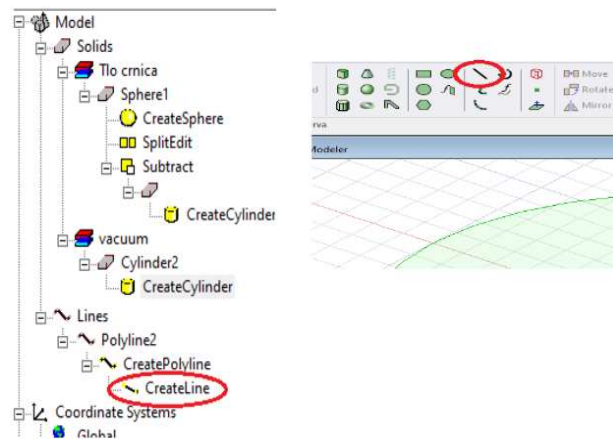
Među zadnjim koracima treba još napraviti postavke analize. To se radi odabirom „Maxwell 3D“ u alatnoj traci i dodavanjem postavki rješenja, prikazano na slici 7.17.



*Slika 7.17. Podešavanje postavki rješenja simulacije*

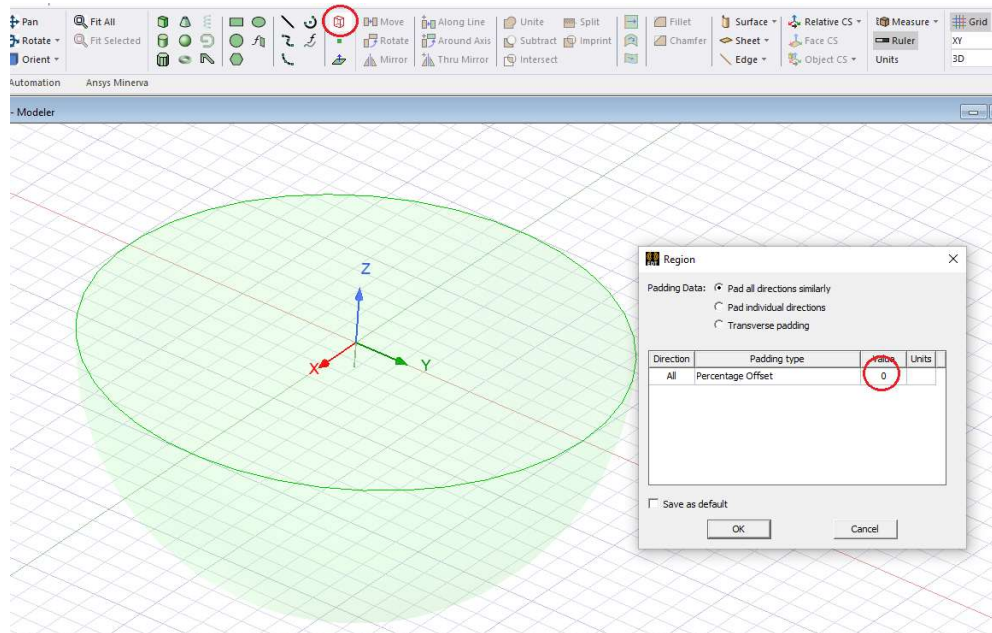
Za kraj modeliranja je potrebno još napraviti „Region“ i „Polyline“. „Polyline“ predstavlja pravac koji nam služi za određivanje raspona udaljenosti u kojem želimo da nam graf potencijalnog lijevka prikazuje vrijednosti potencijala. „Polyline“ se odabire na alatnoj traci kao što je prikazano na slici 7.18. Nakon odabira, desnim klikom se ide na „Properties“ i upisuju

se parametri. Početak se nalazi na ishodištu koordinatnog sustava (0,0,0), a kraj je na rubu polukugle u smjeru Y osi (može i X osi) odnosno na koordinatama (0, 20, 0).

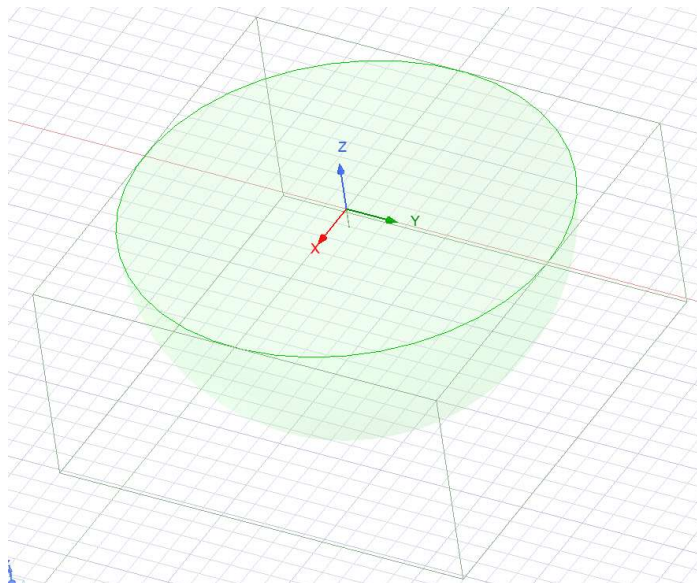


*Slika 7.18 Lokacija modela „Polyline”*

„Region” predstavlja područje koje će biti obuhvaćeno u simulaciji. To se radi odabirom „Create Region“ u alatnoj traci i postaviti da regija bude točno veličine objekta, odnosno da bude pomaknuta za 0 %, prikazano na slici 7.19. Konačan izgled regije je na slici 7.20. Određivanjem regije je omogućeno da program gleda kao jednu cjelinu sve predmete unutar regije.



*Slika 7.19 Određivanje veličine regije*



*Slika 7.20 Konačan izgled regije*

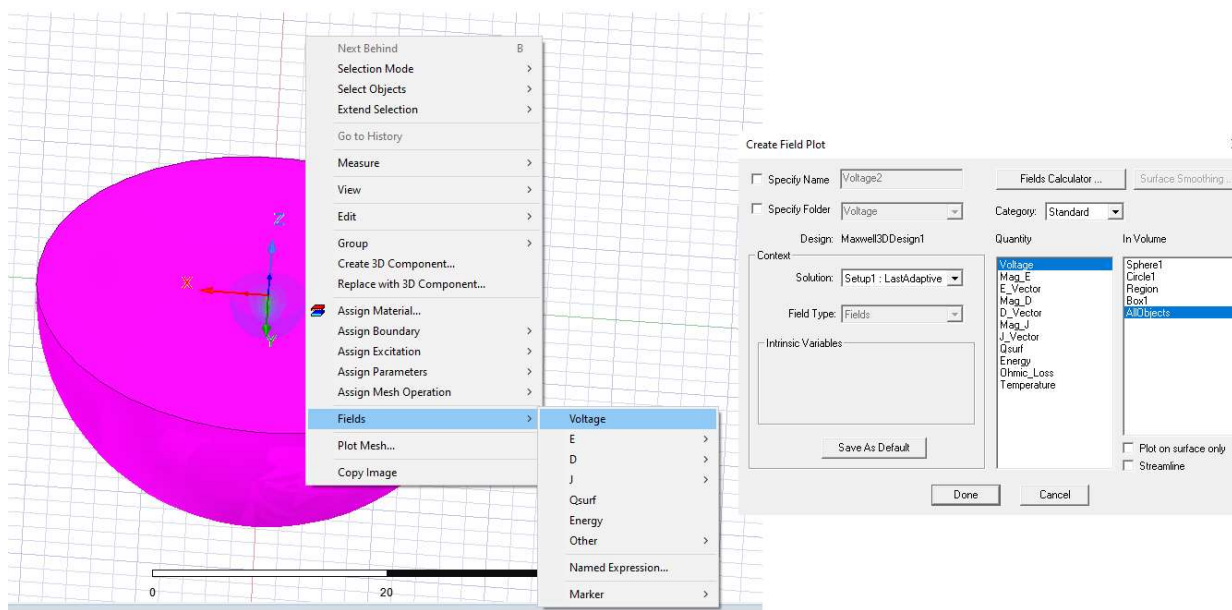
Region i polyline se trebaju sakriti čisto iz razloga da konačan izgled simulacije ljepše izgleda. Desni klik miša i ide se na „Selection Mode” te odabire „Objects” kako bi se označavali modeli u cijeloj svojoj izvedbi. Da bi sakrili „Region” prvo ga treba odabrati i desnim klikom miša ide se na „View” i odabire „Hide this object”. Postupak se ponovi i za polyline.

Kada se svi prethodni koraci završe treba provjeriti da li je sve u redu preko „Validation check” i ako je sve zeleno programu treba omogućiti da analizira sve zadane parametre preko naredbe „Analyze All”, naredbe se nalaze pod „Maxwell 3D” kao što je prikazano prema slici 7.21. Kada se pokrene „Analyze All” može doći do vrlo dugog čekanja ako se poligoni za „Mesh” (slika 7.15) postave vrlo gusto, odnosno da je duljina poligona jako mala. Odabrano je 2 m jer je promjer polukugle 40 m pa se 2 m činilo prihvatljivom duljinom poligona, a da nisu previše rijetko postavljeni (slika 7.16). Analiza podataka s tako odabranim parametrima je trajala otprilike 5-6 minuta. Kada je simulacija prvotno pokrenuta s duljinom poligona od 8 m trajanje analize je trajalo 1 minutu i bili su prerijetko postavljeni, stoga je odlučeno da se postavi na 2 m.

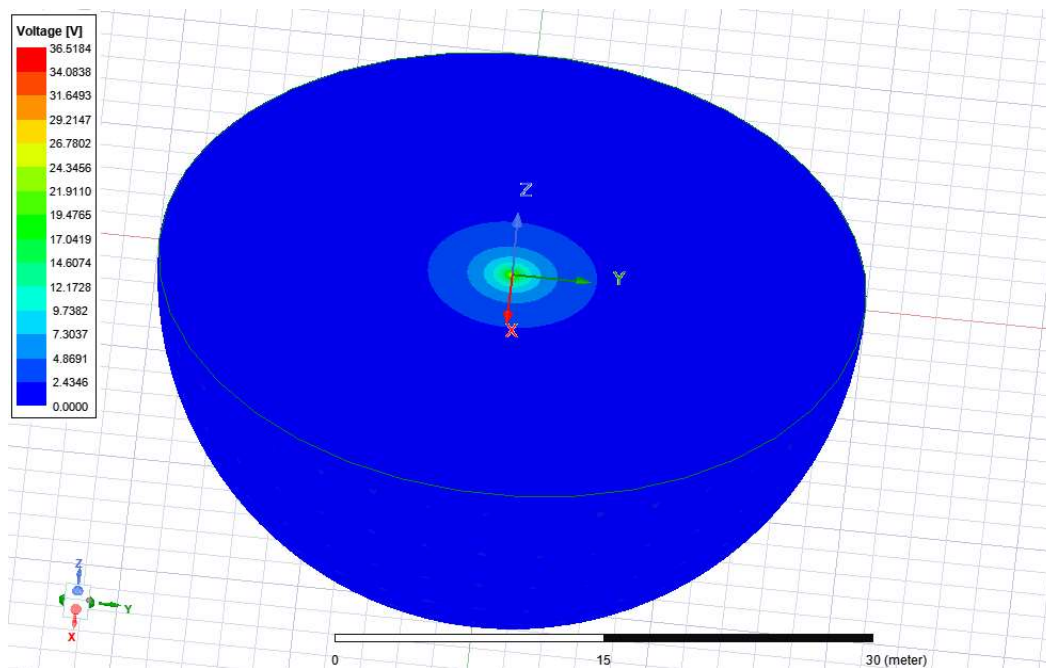


*Slika 7.21 Provjera unesenih parametara i analiza svih parametara*

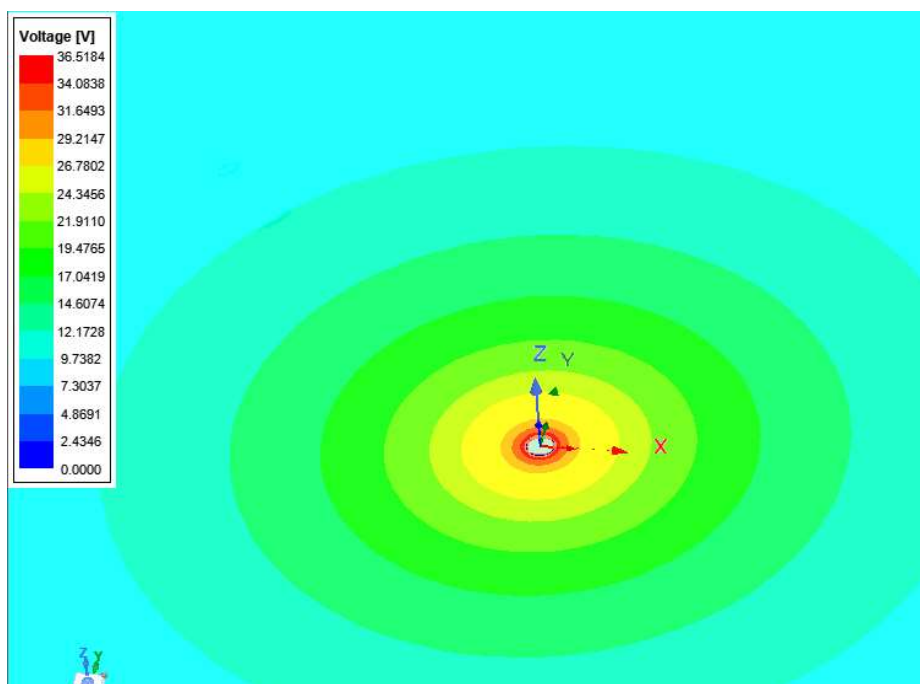
Simulacija je završena i sad se može krenuti na pregled dobivenih rezultata simulacije. Za potrebe zadatka treba vidjeti izgled raspodjele potencijala po tlu i graf potencijalnog lijevka. Raspodjela potencijala se vidi tako da se označi sve preko  $\text{ctrl}+\text{a}$ , stisne desni klikom i ide se na „Fields“ i odabire se „Voltage“ kao prema slici 7.22. Kada se otvori prozor odabire se prikazivanje potencijala na „All Objects“. Na osnovu toga će simulator pokazati raspodjelu potencijala tla i na uzemljivaču kao što se vidi na slikama 7.23. i 7.24.



*Slika 7.22 Koraci za prikaz raspodjele potencijala po tlu*



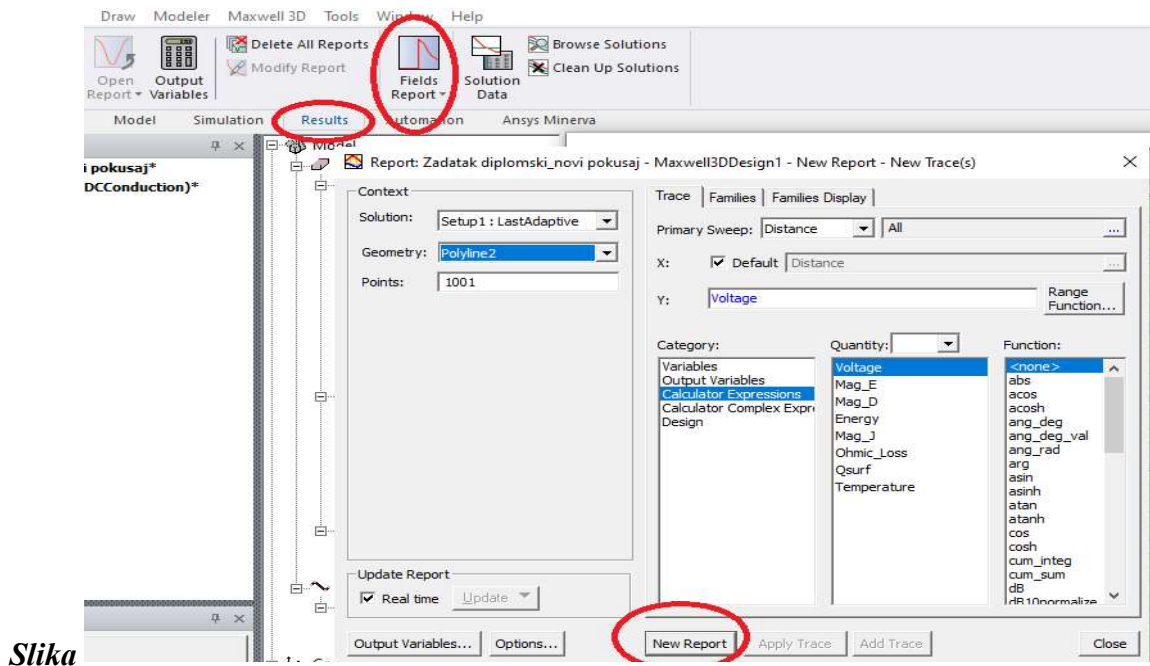
*Slika 7.23 Prikaz raspodjele potencijala tla*



*Slika 7.24 Prikaz raspodjele potencijala oko štavnog uzemljivača*



Za prikaz potencijalnog lijevka potrebno je otići preko „Results” na „Fields Report” te odabrati da se prikaže graf u 2D formatu, kao što je na slici 7.25. U postavkama za „Fields Report” se treba odabrati ime za „Polyline” koji se koristio pri crtanju po površini polukugle, za ovaj slučaj to je „Polyline2” (slika 7.18). Ostale postavke podesiti kao prema slici 7.25 i stisnuti „New Report”.



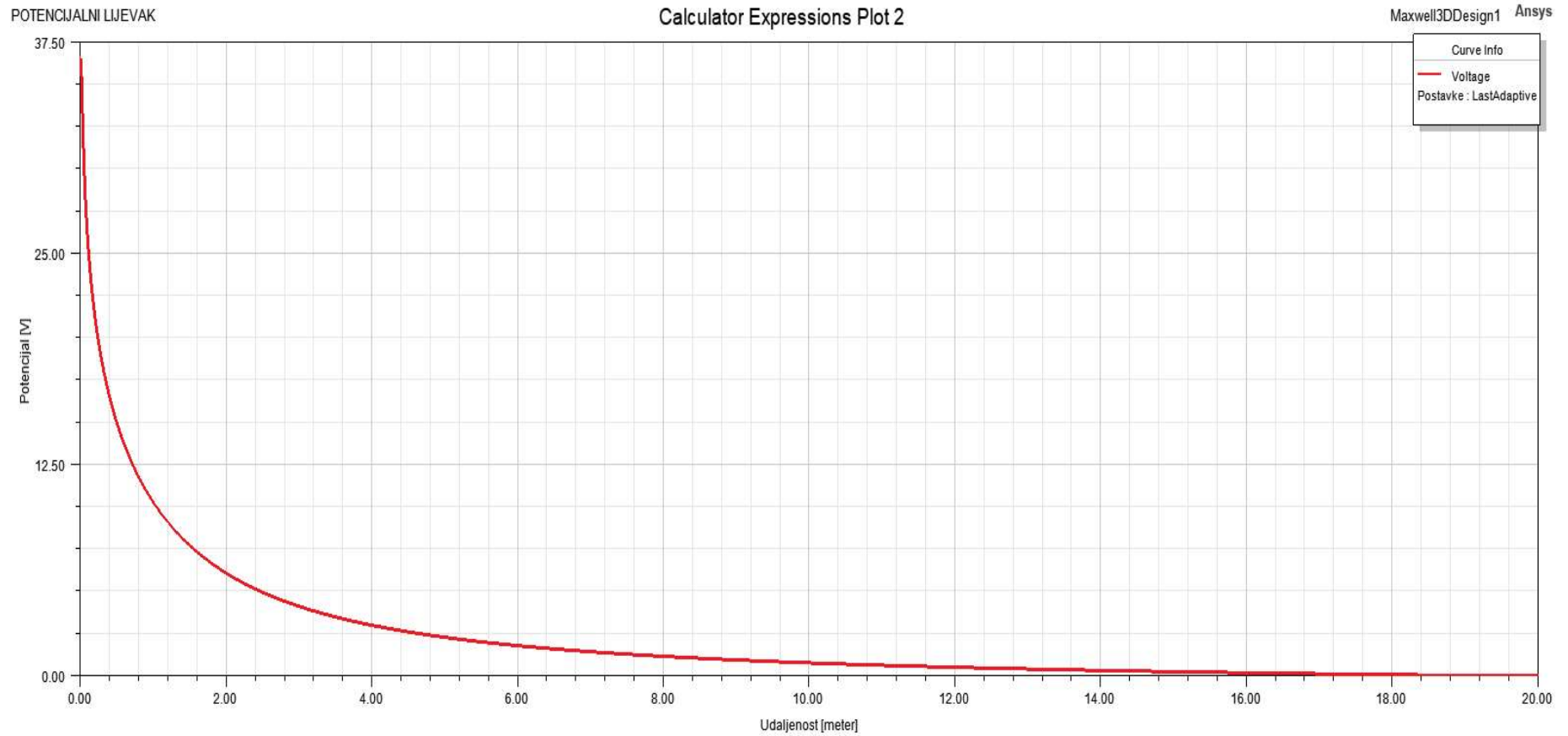
Slika

7.25 Postavke za prikaz grafa potencijalnog lijevka

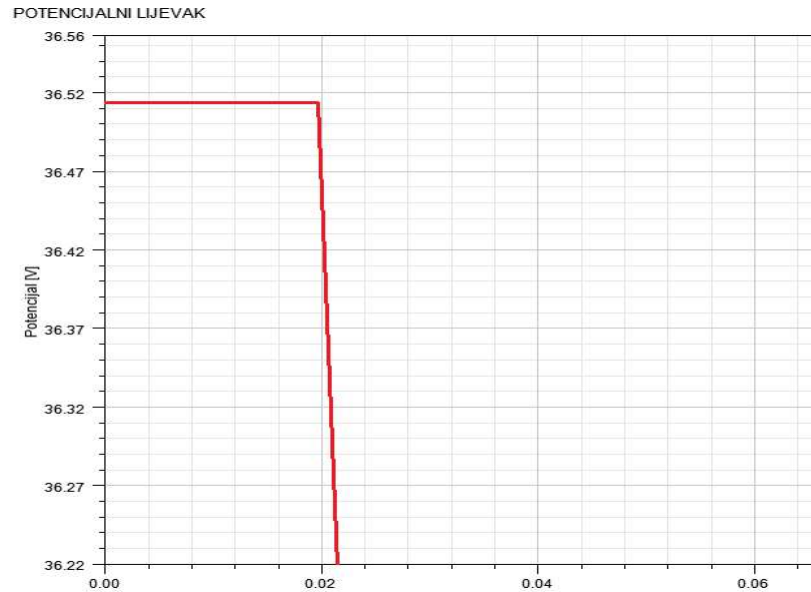
Graf potencijalnog lijevka u tlu koji je nastao na osnovu zadanih parametara u zadatku je prikazana na slici 7.26. Na slici 7.27. se vidi da je potencijal na štapnom uzemljivaču uvijek isti i iznosi:

$$\varphi_s = 36,52V \quad (7.1-1)$$

Taj iznos potencijala se moglo vidjeti i iz slike 7.24.



*Slika 7.26 Graf potencijalnog lijevka*



*Slika 7.27 Potencijal štapnog uzemljivača*

Sada kada znamo rezultate simulacije trebalo bi potvrditi te rezultat i računskim putem kako bi vidjeli da li postoji odstupanje i da li je simulacija pravilno izvedena.

Prema zadatku treba izračunati iznos otpora uzemljenja štapnoga uzemljivača ukupan u ravnini s površinom tla, a ono se računa prema formuli 6.1-1:

$$R_{z,\check{s}} = \frac{\rho_z}{2\pi l} \cdot \left( \ln\left(\frac{8l}{d}\right) - 1 \right) = \frac{100}{2\pi \cdot 2} \cdot \left( \ln\left(\frac{8 \cdot 2}{0,05}\right) - 1 \right) = 37,95 \Omega \quad (7.1-2)$$

Rezultat otpora uzemljenja štapnoga uzemljivača prema rezultatima simulacije 7.1-1 se računa iz omovog zakona:

$$R_{z,\check{s}} = \frac{\varphi_{\check{s}}}{I} = \frac{36,52}{1} = 36,52 \Omega \quad (7.1-3)$$

Iznos razlike rezultata otpora:

$$\Delta R_{z,\check{s}} = 37,95 - 36,52 = 1,43 \Omega \quad (7.1-4)$$

gdje je:  $\Delta R_{z,\check{s}}$  - razlika otpora uzemljenja štapnog uzemljivača dobivenog računskim putem i iz simulacije

## 7.2 ZADATAK 2

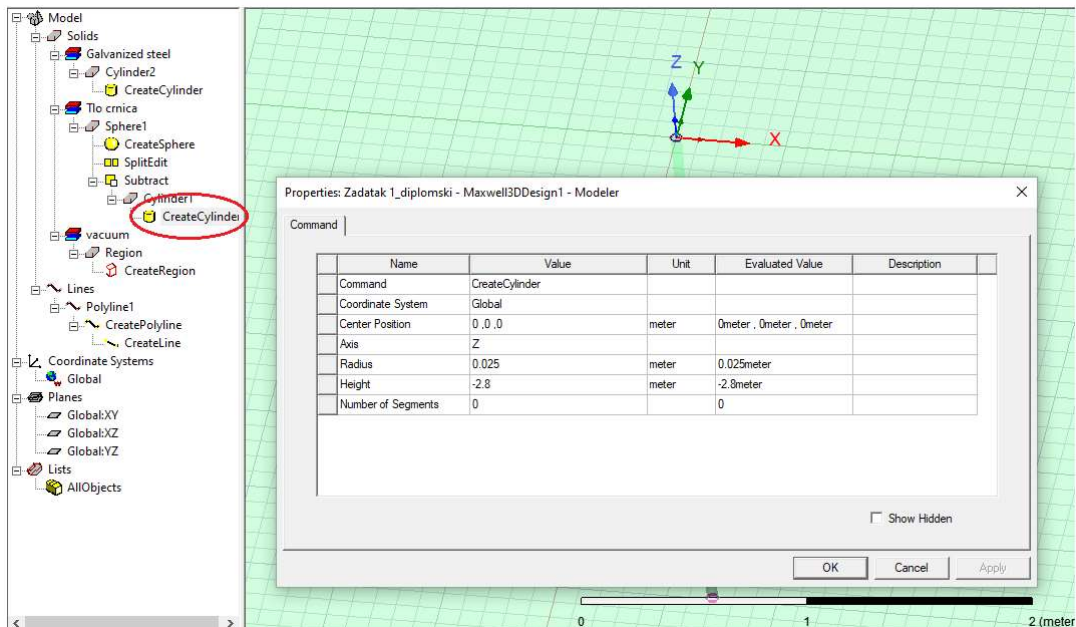
Potrebno je odrediti otpor uzemljenja i raspodjelu potencijala za štapni uzemljivač koji je ukopan na dubinu od 80 cm u programskom paketu ANSYS Maxwell. Zadani podaci su: promjer štapnog uzemljivača je 5 cm, duljine 2 m, otpornost tla je  $100 \Omega\text{m}$ , materijal uzemljivača je pocinčani čelik, a tlo je oblika polukugle radijusa 20 m.

$$d_s = 5 \text{ cm} = 0.05 \text{ m} \quad l = 2 \text{ m} \quad \text{FeZn}$$

$$r_{\text{tlo}} = 20 \text{ m} \quad \rho_z = 100 \Omega\text{m} \quad h = 0,8 \text{ m}$$

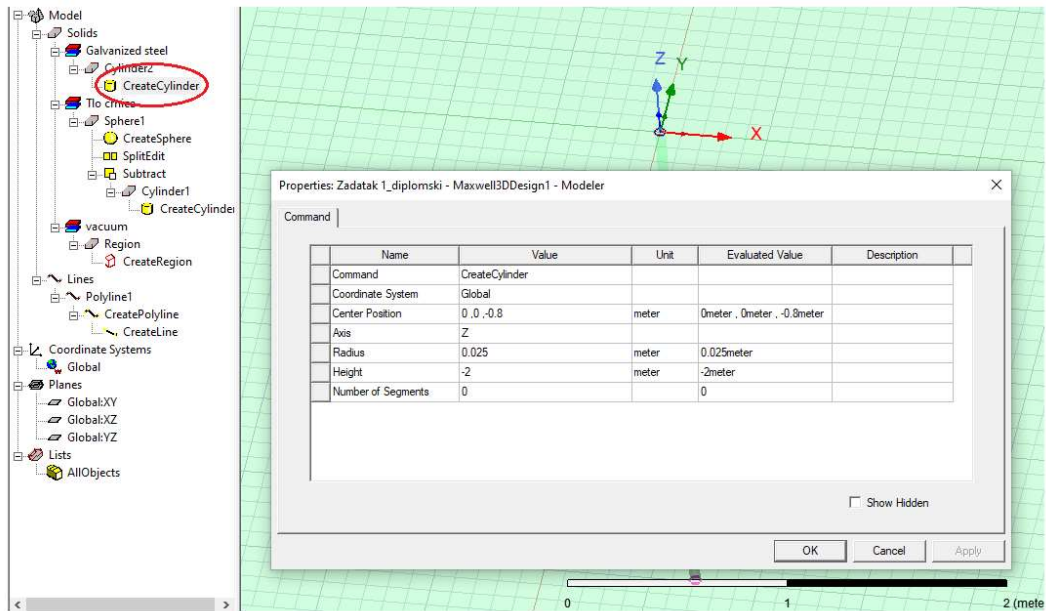
Ovaj zadatak se ne razlikuje puno u odnosu na zadatak 1 pa će se postaviti slike dijelova simulacije samo one koje se razlikuju. Glavna razlika se odnosi na sami uzemljivač u smislu njegova ukapanja dok su dimenzije i materijal uzemljivača ostali nepromijenjeni. Parametri modela polukugle, parametri mreže, postavke simulacije, dimenzije regije, „Polyline” lokacija, iznos i smjer pobude, „Sink” kalote, također ostaju nepromijenjeni.

Za početak treba povećati dubinu rupe koja se nalazi uzemljivač, odnosno treba postaviti da je njegova dubina sada 2,8 m, prikazano na slici 7.28.

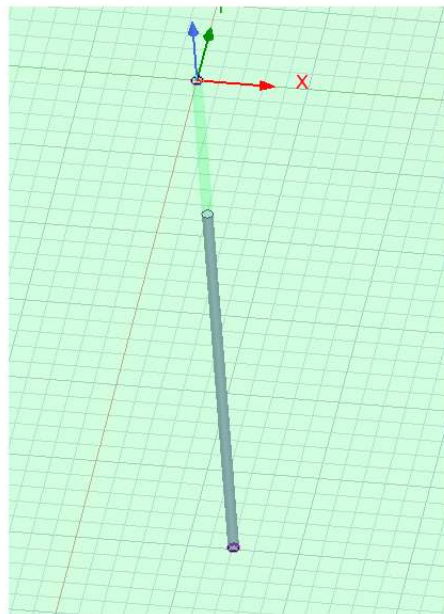


*Slika 7.28 Nove dimenzije rupe za ukop uzemljivača*

Sada treba pozicionirati štapni uzemljivač na dubinu od 80 cm dok mu dimenzije i vrsta materijala ostaju isti. To se mijenja tako da se njegove koordinate postave na 0,0,-0.8, kao što se vidi na slici 7.29, dok je konačan izgled prikazan na slici 7.30

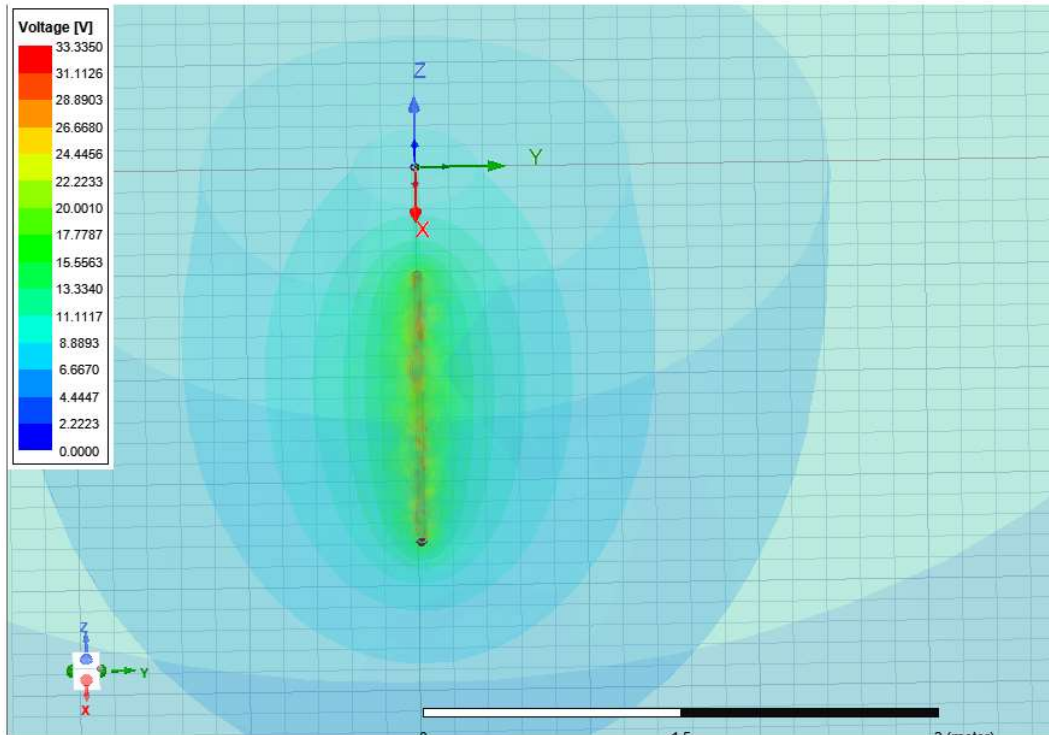


*Slika 7.29 Nova lokacija štapnog uzemljivača*



*Slika 7.30. Konačan izgled ukopanog štapnog uzemljivača*

Sada je potrebno provjeriti da li su svi koraci pravilno odrađeni, a to se radi preko „Validation Check”, ako je sve zeleno može se pokrenuti „Analyze All”. Kada simulator obradi sve parametre prate se koraci kao prema slici 7.22. Nove vrijednosti raspodjele potencijala tla mogu se vidjeti na slici 7.31.



*Slika 7.31 Raspodjela potencijala tla za ukopani štapni uzemljivač*

Na slici 7.31. se vidi da je potencijal na štapnom uzemljivaču iznosa:

$$\varphi_s = 33,34 \text{ V} \quad (7.2-1)$$

Sada kada znamo rezultate simulacije trebalo bi potvrditi te rezultat i računskim putem kako bi vidjeli da li postoji odstupanje i da li je simulacija pravilno izvedena.

Prema zadatku treba izračunati iznos otpora uzemljenja štapnog uzemljivača ukupan u ravnini s površinom tla, a ono se računa prema formuli 6.1-2 i 6.1-3 ( $t=h$ ):

$$t_h = t + \frac{1}{2}l = 0,8 + \frac{1}{2} \cdot 2 = 1,8 \text{ m} \quad (7.2-2)$$

$$R_{z,s} = \frac{\rho_z}{2\pi l} \cdot \left[ \ln\left(\frac{2l}{d}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{4t_h+l}{4t_h-l}\right) \right]$$

$$R_{z,s} = \frac{100}{2\pi \cdot 2} \cdot \left[ \ln\left(\frac{2 \cdot 2}{0,05}\right) + \frac{1}{2} \cdot \ln\left(\frac{4 \cdot 1,8+2}{4 \cdot 1,8-2}\right) \right] = 35,69 \Omega \quad (7.2-3)$$

Rezultat otpora uzemljenja štapnog uzemljivača prema rezultatima simulacije 7.2-1 se računa iz omovog zakona:

$$R_{z,s} = \frac{\varphi_s}{I} = \frac{33,34}{1} = 33,34 \Omega \quad (7.2-4)$$

Iznos razlike rezultata otpora:

$$\Delta R_{z,s} = 35,69 - 33,34 = 2,35 \Omega \quad (7.2-5)$$

Razlog odabira struje od 1A je kako bi moglo odmah vidjeti otpor uzemljenja za ovaj zadatak. Ohmov zakon glasi  $R=\varphi/I$ , a pošto je struja pobude 1 A tada je  $R=\varphi$  i otpor uzemljenje štapnog uzemljivača je 36,52  $\Omega$  odnosno 33,34  $\Omega$ .

**ZAKLJUČAK**

Korištenjem programa Ansys Electronics Desktop 2022 R1 bilo je potrebno simulirati izgled raspodjele potencijala štapnog uzemljivača kada se nalazi u ravnini s tlo i na određenoj dubini te usporediti rezultate na kraju. Kao usporedba koristila se formula za izračun otpora uzemljenja čiji rezultat se usporedio s iznosom koji se dobio u simulaciji. Možemo zaključiti da se u obje simulacije dobio željeni rezultat te da je dokazano putem simulacije da se otpor uzemljenja smanjuje s povećanjem dubine ukopa. Smanjenje otpora uzemljenja iznosi oko  $3 \Omega$ , ono se nije značajno smanjilo, ali je puno bitnije da se izbjegla zona smrzavanja. U prvome zadatku razlika rezultata otpora uzemljenja je iznosila  $1,43 \Omega$ , a u drugome  $2,35 \Omega$ . Za oba zadatka se može reći da su kvalitativno odrađena jer se rezultati otpora uzemljenja neznatno razlikuju između simulacije i računskim putem. Za točnije rješenje se može uzeti ono dobiveno simulacijom jer računске formule su pojednostavljene kako bi inženjeri lakše došli do rezultat uz neznatna odstupanja. Radijus tla je 10 puta veći od duljine uzemljivača te iznosi 20 m kako bi se zahvatila dovoljno velika udaljenost da se dođe do neutralne zemlje i samim time da rezultati mjerenja budu točniji. Razlog odabira struje od 1A je kako bi moglo odmah vidjeti otpor uzemljenja u simulatoru. Ohmov zakon glasi  $R=U/I$ , a pošto je struja pobude 1 A tada je  $R_{z,s}=(\varphi_s-\varphi_0)/I = (36,52 - 0)/1$  i otpor uzemljenja štapnog uzemljivača je  $36,52 \Omega$  odnosno  $33,34 \Omega$ . U grafu potencijalnog lijevka se potvrdilo da je potencijal uzemljivača u cijeloj svojoj izvedbi uvijek isti bez obzira na dubinu ukopa. Kao završni zaključak ova dva zadatka se ne može reći da su točna jer su u oba slučaja radi o homogenom jednoslojnom tlu, a to u praksi ne skoro i ne postoji, stoga bi u praksi rezultati dobiveni mjerenjima na terenu bili nešto drugačiji.



**LITERATURA**

- [1] Majdančić, F., Uzemljivači i sustavi uzemljenja, Graphis Zagreb, 2004. godina
- [2] Požar, H., Visokonaponska rasklopna postrojenja, 5. izdanje, Tehnička knjiga Zagreb, 1990. godina
- [3] Napon dodira i napon koraka: <https://www.easypower.com/resources/article/touch-and-step-voltage-calculations>, pristupljeno 23.04.2022.
- [4] Pogonsko uzemljenje: <https://www.electricaldeck.com/2021/11/what-is-neutral-grounding-definition-types-advantages.html>, pristupljeno 25.04.2022.
- [5] Gromobransko uzemljenje: <https://www.dehn-ua.com/en/lightning-protection-system>, pristupljeno 25.04.2022.
- [6] Vučevac, I.; Diplomski rad "Uzemljivači.", Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2016., preuzeto s <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:200:143290>, dana 27.04.2022.
- [7] Knežević, G., Uzemljivači i sustavi uzemljenja, materijali s predavanja, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, preuzeto dana: 27.04.2022.
- [8] Bakuta, L.; Završni rad „Goelektrična i geotermička ispitivanja tla”, Sveučilište u Splitu, Sveučilišni odjel za stručne studije, preuzeto s : <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:228:095455>, dana 05.05.2022.
- [9] Krulc, Z.: Otpornost tla i goelektrična-geološka građa tla, Elektrotehnika, Zagreb, br.3, 1986.
- [10] ... IEEE Guide for safety in AC Substation Grounding, IEEE std 80-2000, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, New York, USA
- [11] H., Ševko; Udžbenik za Laboratorijske vježbe za 2. razred elektrotehničke škole, Elektrotehnička škola za energetiku Sarajevo, Sarajevo, 2009. godina

- [12] ... Pravilnik o sigurnosti i zdravlju pri radu s električnom energijom:  
[https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012\\_08\\_88\\_2019.html](https://narodne-novine.nn.hr/clanci/sluzbeni/2012_08_88_2019.html), pristupljeno 07.06.2022.
- [13] Podjela opasnih napona: <https://electrical-engineering-portal.com/6-voltages-a-person-can-be-exposed-to-in-a-substation>, pristupljeno 15.06.2022.
- [14] Karmišević, M.; Diplomski rad: „Proračun uzemljenja TS 400/110 kV i frekvencijski odziv uzemljivača”, Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek, 2014. godina
- [15] Shaughnessy, T; Reprodukcijski rad iz časopisa *Power Quality Assurance*, ožujak/travanj 1998., str. 72-73., preuzeto s: <https://ground-perfect.com/transfer.htm>, dana 15.06.2022.
- [16] Štapni uzemljivač: <https://www.mastertec.eu/en/product/00100165>, pristupljeno 11.08.2022.
- [17] Uzemljivačka traka: <https://www.mastertec.eu/en/products/lightning-protection/earthing-strip>, pristupljeno 11.08.2022.
- [18] Katalog štapnih uzemljivača: <https://www.aleta.hr/hr/kategorija/sustavi-uzemljenja-prenaponska-za-tita/gromobranski-materijal---tapni-uzemljivaci>, pristupljeno 26.08.2022.
- [19] Vodovodna cijev kao uzemljenje: <https://www.engineeringenotes.com/electrical-engineering/earthing/3-different-types-of-earthing-wiring-electrical-engineering/18231>, pristupljeno 31.08.2022.
- [20] Izrada mreže u Ansys-u:  
<https://www.ansys.com/blog/solver-based-meshing-how-to-maintain-high-quality-mesh>, pristupljeno 07.09.2022.
- [21] Ansys Maxwell 3D priručnik, verzija 11:  
[http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D\\_V11.pdf](http://ansoft-maxwell.narod.ru/en/CompleteMaxwell3D_V11.pdf), pristupljeno 07.09.2022.
- [22] Slika mrežastog uzemljivača:  
[https://www.researchgate.net/figure/Grid-earthing-scheme-29\\_fig1\\_329038088](https://www.researchgate.net/figure/Grid-earthing-scheme-29_fig1_329038088), pristupljeno 11.09.2022.

**ŽIVOTOPIS**

Karlo Jakopović rođen je 14. prosinca 1995. u Zagrebu. Završio je osnovnu školu „Gustav Krklec“ u Zagrebu 2010. godine te upisao Elektrotehničku školu Zagreb za zanimanje elektrotehničar. Za vrijeme srednjoškolskog obrazovanja upisuje Cisco Networking Academy 2012. godine. Godine 2014. završava srednju školu i polaže državnu maturu, te iste godine završava i Cisco Networking Academy i stječe titulu specijalista za računalne mreže. Stručnu praksu u srednjoj školi obavlja u Hrvatskoj elektroprivredi, HEP - Operator distribucijskog sustava d.o.o. Zagreb u pogonu Sveta Klara. 2014. godine nakon položene državne mature upisuje preddiplomski studij elektrotehnike na Elektrotehničkom fakultetu Osijek, sada Fakultet elektrotehnike, računarstva i informacijskih tehnologija Osijek. Na drugoj godini studija odabire studijski blok elektroenergetika. Završio je online tečaj 2016. godine na Shaw Academy pod nazivom “Introduction to Web Development”. Preddiplomski studij završava 2020. i stječe titulu prvostupnika elektrotehnike i informacijskih tehnologija, a tema završnog rada je „Proračun hlađenja transformatora”. Za diplomski studij elektrotehnike 2020. godine odabire izborni blok „Održiva elektroenergetika”. Stručnu praksu obavlja u kompaniji KONČAR – Distributivni i specijalni transformatori d.d. u Zagrebu.

U Osijeku, rujan 2022. godine

Karlo Jakopović

Potpis: \_\_\_\_\_



## SAŽETAK

U ovome diplomskom radu se trebala napraviti simulacija štapnoga uzemljivača pomoću programskog paketa ANSYS. Prije odrađivanja simulacije potrebno je napisati teorijsku pozadinu o uzemljivačima s njihovim primjenama u praksi. Uzemljivački sustavi se mogu podijeliti u četiri grupe, a to su: pogonska, zaštitna, gromobranska i združena uzemljenja. S obzirom da se svaki uzemljivački sustav ukopava u tlo, osim gromobranskog, trebalo je objasniti na koje načine tlo može utjecati na uzemljivač te kakvi sve tipovi tla postoje na teritoriju Republike Hrvatske. Sada su se objasnile osnovne informacije o uzemljenju pa se može prijeći na pojavu napona dodira i napona koraka i zašto je to bitno kod sustava uzemljenja. Svaki sustav uzemljenja se sastoji od određenih tipova uzemljivača, a tipovi uzemljivača su objašnjeni u zadnjem teorijskom poglavlju. Za kraj je još trebalo napraviti praktični dio u simulatoru i pokazati na konkretnom slučaju kako izgledaju raspodjela potencijala na tlu i naponski lijevak.

**Ključne riječi:** uzemljenje, tipovi uzemljenja, štapni uzemljivač, pocinčani čelik, Ansys Maxwell, simulator, napon dodira, napon koraka, razlika potencijala, tlo.

## ABSTRACT

In this diploma thesis, the simulation of a grounding rod was to be done using the ANSYS software package. Before performing the simulation, it was necessary to write a theoretical background about grounding devices and their practical applications. Grounding systems can be divided into four groups, namely: drive, protective, lightning protection and combined grounding. Given that every grounding system is buried in the ground, except for the lightning rod, it was necessary to explain in what ways the soil can affect the grounding device and what types of soil exist on the territory of the Republic of Croatia. Now, after the basic information about grounding has been explained, we can move on to the appearance of touch voltage and step voltage and why these are important in a grounding system. Each grounding system consists of certain types of grounding devices, and the types of earthing devices are explained in the last theoretical chapter. Finally, a simulation of the practical part was done and showed in a concrete case what the potential distribution on the ground and the voltage funnel look like.

**Key words:** grounding, types of grounding, earth rod, galvanized steel, Ansys Maxwell, simulator, touch voltage, step voltage, potential difference, ground.

## PRILOZI

## POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA

| Simbol             | Naziv   | Mjerna jedinica |
|--------------------|---|-----------------|
| a                  | Srednja udaljenost između štapnih uzemljivača                         | m               |
| A                  | Koeficijent mrežastog uzemljivača                                     | /               |
| $a_t$              | Širina trake  | m               |
| $b_t$              | Visina trake  | m               |
| d                  | Promjer   | m               |
| $I_{IKS}$          | Struja jednofaznog kratkog spoja                                      | A               |
| $I_z$              | Struja uzemljenja (struja kvara)                                      | A               |
| $K_{r\check{s}}$   | Redukcijski faktor, ovisi o omjeru a/l                                | /               |
| $K_p$              | Korekcijski koeficijent   | /               |
| l                  | Duljina   | m               |
| L                  | Opseg četverokutnog uzemljivača                                       | m               |
| $l_{mr}$           | Ukupna duljina vodiča u mrežastom uzemljivaču                         | m               |
| n                  | Broj paralelno spojenih štapnih uzemljivača                           | /               |
| r                  | Polumjer  | m               |
| $R_i$              | Impulsni otpor uzemljenja   | $\Omega$        |
| $r_k$              | Redukcijski faktor kabela   | /               |
| $R_r$              | Otpor rasprostiranja  | $\Omega$        |
| $R_z$              | Otpor uzemljenja  | $\Omega$        |
| $R_{z,\check{s}}$  | Otpor uzemljenja štapnog uzemljivača                                  | $\Omega$        |
| $R_{z1}$           | Vrijednost otpora uzemljenja u trafostanici nastanka kvara            | $\Omega$        |
| $R_{z1,\check{s}}$ | Otpor uzemljenja jednog štapnog uzemljivača                           | $\Omega$        |
| $R_{zv}$           | Otpor zemljovoda  | $\Omega$        |
| S                  | Površina poprečnog presjeka   | m <sup>2</sup>  |
| t                  | Dubina od površine zemlje do gornjeg ruba štapnog uzemljivača         | m               |
| $t_h$              | Dubina od površine zemlje do polovice štapnog uzemljivača             | m               |
| $U_1$              | Napon na početku metalnog plašta kabela u trafostanici nastanka kvara | V               |
| $U_d$              | Napon dodira  | V               |
| $U_k$              | Napon koraka  | V               |

**POPIS KORIŠTENIH OZNAKA I SIMBOLA, NASTAVAK**

| <b>Simbol</b>            | <b>Naziv</b>  | <b>Mjerna jedinica</b> |
|--------------------------|---|------------------------|
| $U_x$                    | Potencijal na udaljenosti „x” od uzemljivača  | V                      |
| $U_{x+1}$                | Potencijal na udaljenosti 1m od prve točke  | V                      |
| $U_z$                    | Napon uzemljivača   | V                      |
| $V_0$                    | Potencijal daleke zemlje  | V                      |
| $V_z$                    | Potencijal uzemljivača  | V                      |
| $\alpha_1$               | Negativni temperaturni koeficijent  | K <sup>-1</sup>        |
| $\Delta R_{z,\check{s}}$ | Razlika otpora uzemljenja štapnog uzemljivača dobiven računskim putem i iz simulacije | $\Omega$               |
| $\rho_z$                 | Otpornost tla   | $\Omega\text{m}$       |
| $\rho_z$                 | Nova (prepravljena) vrijednost otpornosti tla   | $\Omega\text{m}$       |
| $\rho_{zi}$              | Stvarna (izmjerena) vrijednost otpornosti tla   | $\Omega\text{m}$       |