

Frekventno ovisni 3D model jednostavne konfiguracije uzemljivača

Jurak, Sven

Master's thesis / Diplomski rad

2024

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Zagreb, Faculty of Electrical Engineering and Computing / Sveučilište u Zagrebu, Fakultet elektrotehnike i računarstva**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:168:634160>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-15**



Repository / Repozitorij:

[FER Repository - University of Zagreb Faculty of Electrical Engineering and Computing repository](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 151

**FREKVENTNO OVISNI 3D MODEL JEDNOSTAVNE
KONFIGURACIJE UZEMLJIVAČA**

Sven Jurak

Zagreb, lipanj 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET ELEKTROTEHNIKE I RAČUNARSTVA

DIPLOMSKI RAD br. 151

**FREKVENTNO OVISNI 3D MODEL JEDNOSTAVNE
KONFIGURACIJE UZEMLJIVAČA**

Sven Jurak

Zagreb, lipanj 2024.

DIPLOMSKI ZADATAK br. 151

Pristupnik: **Sven Jurak (0036516543)**
Studij: Elektrotehnika i informacijska tehnologija
Profil: Elektroenergetika
Mentor: prof. dr. sc. Davor Grgić

Zadatak: **Frekventno ovisni 3D model jednostavne konfiguracije uzemljivača**

Opis zadatka:

Analizirati modeliranje frekventno ovisnih otpora uzemljenja (induktivitet i kapacitet tla i korištenih vodiča) koristeći Ansys HFSS program za jednostavne 3D konfiguracije uzemljivača u slučaju atmosferskih pražnjenja. Usporediti otpor uzemljenja, raspodjelu struje i porast potencijala tla sa onima dobivenim programom Ansys Maxwell za istosmjernu struju i odrediti područje frekvencija kad razlike u dobivenim rezultatima postaju značajne.

Rok za predaju rada: 28. lipnja 2024.

Veliko hvala prof.dr.sc. Davoru Grgiću na svoj pruženoj pomoći i danim smjernicama prilikom izrade diplomskog rada.

Sadržaj

Uvod	3
1. Osnovno o uzemljivačkom sustavu	4
1.1. Zašto koristimo uzemljenje	4
1.2. Naponi dodira i koraka	4
1.3. Štapni uzemljivač	8
1.4. Specifični otpor tla	12
2. Utjecaj frekvencije.....	14
2.1. Impedancija uzemljivačkog sustava	14
2.2. Utjecaj frekvencije na ponašanje tla.....	16
2.2.1. Promjena parametara tla	16
2.2.2. Ionizacija tla	19
2.3. Utjecaj frekvencije na ponašanje uzemljivačke šipke	20
2.3.1. Skin efekt.....	20
2.3.2. Struja pomaka.....	23
2.4. Model električnog kruga frekvencijski ovisnog uzemljenja.....	24
2.5. Karakteristična frekvencija.....	25
2.6. Određivanje vrijednosti impedancije.....	28
2.7. Impulsni koeficijent.....	28
2.8. Uzroci pojave viših harmonika.....	29
2.8.1. Atmosfersko pražnjenje	29
2.8.2. Sklopne radnje	32
2.8.3. Kratki spoj	32
3. Proračuni u različitim softverima	34
3.1. Opis modela.....	34
3.2. HFSS [32].....	36

3.2.1.	Modeliranje u HFSS	40
3.3.	ANSYS	59
3.4.	Maxwell	59
4.	Analiza rezultata	60
4.1.	DC uzemljenje ANSYS jednoslojno tlo	60
4.2.	DC uzemljenje Maxwell jednoslojno tlo	63
4.3.	AC uzemljenje HFSS jednoslojno tlo.....	65
4.4.	DC uzemljenje ANSYS dvoslojno tlo	73
4.5.	DC uzemljenje Maxwell dvoslojno tlo.....	75
4.6.	AC uzemljenje HFSS dvoslojno tlo	77
	Zaključak	80
	Literatura	81
	Sažetak.....	85
	Summary.....	86
	Skraćenice.....	87

Uvod

Ovaj diplomski rad može se smatrati nastavkom seminarskog rada *FEM proračun otpora uzemljenja za uzemljivačku traku u kombinaciji sa štapnim uzemljivačima*. Nakon proučavanja osnova o uzemljenju, uzemljivačkim sustavima te utjecaju konfiguracije uzemljivača i otpornosti tla na vrijednost otpora sustava i potkrepljivanje istog simulacijama na modelu u stacionarnom stanju (DC struja), sada je fokus na utjecaju frekvencije, odnosno AC struji s naglaskom na impulsnu struju groma.

Cilj uzemljivačkog sustava je zaštititi ljude i opremu od električnog šoka te stvoriti niskootporni put za disipaciju struja prilikom kvara, uklapanja i isklapanja, i atmosferskog pražnjenja prema zemlji. Za razliku od DC električnog kruga, u AC krugu se osim otpora R pojavljuju i induktivitet L te kapacitet C , što zajedno predstavljamo impedancijom Z čiji je iznos ovisan o frekvenciji. Promjena iznosa impedancije s frekvencijom nije zanemariva i iz tog razloga potrebno je proučiti frekventnu ovisnost otpora uzemljivačkog sustava.

U ovom radu prvo će biti prikazana osnovna teorija o uzemljenju, zašto ga koristimo te utjecajni faktori na iznos i ponašanje impedancije uzemljivačkog sustava. Zatim slijedi detaljnija analiza utjecaja frekvencije te valnog oblika struja atmosferskog pražnjenja, preklopnih radnji i kratkog spoja. Kako bi se u praksi proučila teorijska pozadina, u programima ANSYS i Maxwell napravljene su simulacije na jednostavnom modelu štapnog uzemljivača pri injekciji DC struje, a zatim frekventni model u programu HFSS te je injektiran val različitih frekvencija kako bi se prikazao utjecaj frekvencije na uzemljivački otpor i problem prilikom atmosferskog pražnjenja. Na kraju je napravljena analiza kretanja vrijednosti impedancije s frekvencijom, promjena u odnosu na DC rezultate te utjecaj različitih faktora kao što su duljina i radijus šipke, vodljivost i permitivnost tla.

1. Osnovno o uzemlivačkom sustavu

1.1. Zašto koristimo uzemljenje

Uzemljenje je spoj međusobno povezanih metalnih dijelova, koji se nalaze u zemlji, s električnom opremom, instalacijom, postrojenjem ili nekom točkom mreže koja iz bilo kojeg razloga može biti pod naponom. Time je stvoren put za struje kvara i atmosferski uzrokovane struje prema zemlji gdje se one oslobađaju, kako bi se stabilizirao potencijal i bila stvorena točka nultog potencijala čime se osigurava siguran rad i okruženje. Zemlja je beskonačni spremnik naboja, kapacitet, i dodavanje naboja nema nikakvog utjecaj. Površina zemlje smatra se na nultom potencijalu u pogledu razlike potencijala. Apsolutni nulti potencijal kao takav ne postoji.

Funkcije uzemljivanja [1]:

- smanjenje potrebne razine izolacije opreme time što smanjuje operativni napon
- osiguravanje sigurnog rada prijenosnog sustava tako da smanji razliku potencijala vodiča i vrha stupa
- osiguravanje sigurnosti živih bića za vrijeme normalnog rada, u stanju kvara i prilikom radova na prijenosnom sustavu
- eliminiranje statičkog elektriciteta
- smanjenje elektromagnetskih smetnji
- pomoć pri otkrivanju zemljospoja

1.2. Naponi dodira i koraka

Čovjek osjeti struju već i od 0.1 mA, dok struje od 5 mA uzrokuju bol te gubitak kontrole nad mišića i njihovu kontrakciju. Daljnjim povećanjem struje dolazi do fibrilacije arterija te smrti. Važno je i koliko dugo struja teče tijelom te kolika je masa tijela. Kao primjer navodi se dozvoljena struja kroz tijelo mase 70 kg:

$$I_K = 0.157/\sqrt{t} \quad (1.1)$$

, gdje je

I_K – dozvoljena struja kroz tijelo [A],

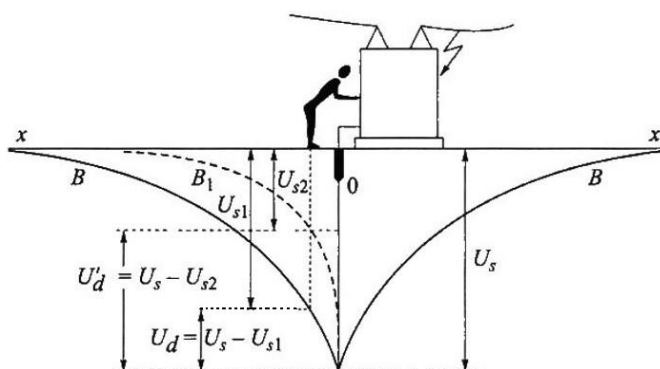
t – trajanje struje [s].

Iz dozvoljene struje i pretpostavljenog otpora tijela od 2000Ω može se dobiti dozvoljeni napon tijela. Još od veće važnosti je dozvoljena razlika potencijala ljudskog tijela i metalne površine.

Kao što je navedeno, osnovna zadaća uzemljivača je zaštita ljudi pri nastanku kvara. Uzemljivački sustav pri odvođenju struje kvara kroz zemlju mora onemogućiti prekoračenje određenih veličina. Glavni pokazatelji njene uspješnosti, odnosno kao pokazatelji dovoljne sigurnosti mjerodavna su dva napona koji definiraju dozvoljenu razliku potencijala: napon dodira i napon koraka.

Napon dodira je dio potencijala uzemljivača, pri prolasku struje kroz njega, koji čovjek može premostiti dodirnom dok stoji jedan metar od uzemljenog objekta.

Naime, prolaskom struje kroz uzemljivač nastaje električno polje odnosno potencijal. Taj potencijal se smanjuje udaljavanjem od uzemljivača po krivulji naziva naponski lijevak čiji prikaz se može vidjeti na slici ispod pod oznakom B.



Slika 1.1 Napon dodira i naponski lijevak [2]

Iz slike dobiva se izraz koji govori o veličini napon dodira:

$$U_d = U_s - U_{s1} \quad (1.2)$$

, gdje je:

U_d – napon dodira [V],

U_s – ukupni napon [V],

U_{s1} – potencijal čovjeka [V].

Točniji rezultat može se dobiti modelom koji čini naponski izvor napona dodira te serijski spoj otpora čovjeka i dodirnog otpora stopala i tla, koji je paralelni spoj otpora dvaju stopala. Time se dolazi do maksimalnog dozvoljenog dodirnog napona koji čovjek može izdržati:

$$U_d = (R_B + R_F/2) \cdot I_K \quad (1.3)$$

, gdje je

R_B – otpor ljudskog tijela (približno 1000 Ω),

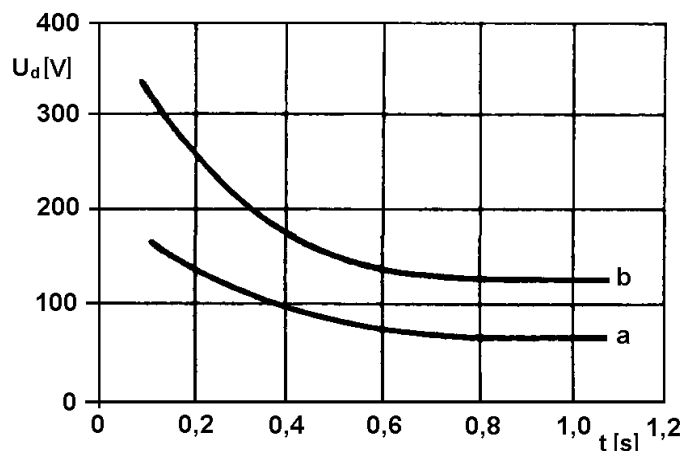
R_F – dodirni otpor stopala i tla [Ω],

$$R_F = \frac{\rho_s}{2d\pi} \quad (1.4)$$

ρ_s – specifični otpor tla [Ωm],

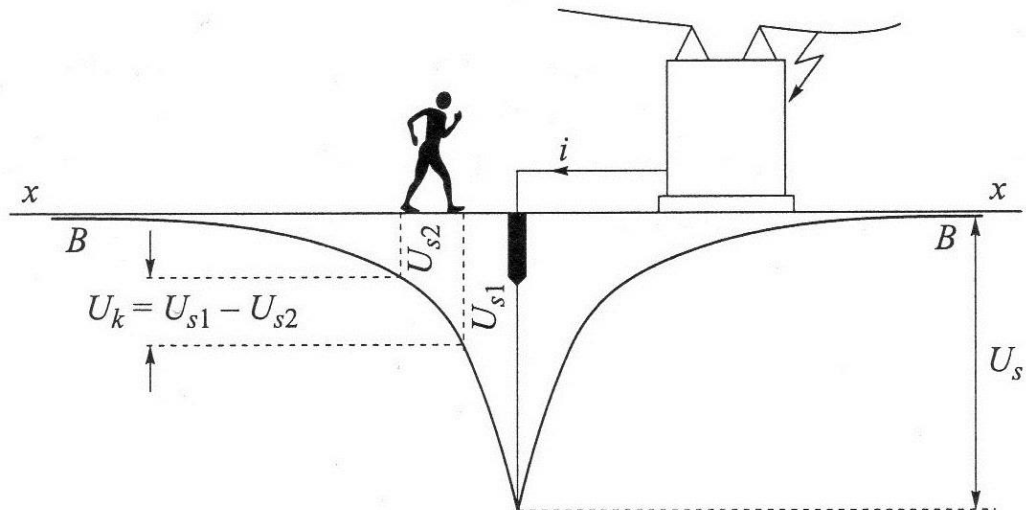
d – duljina stopala [cm].

Maksimalno dozvoljeni napon dodira, prema njemačkim propisima, za postrojenje s djelotvorno uzemljenom nul-točkom u ovisnosti o trajanju struje kroz uzemljivač prikazani su na slici ispod.



Slika 1.2. Dozvoljeni napon dodira prema njemačkim propisima [3]

Napon koraka je razlika potencijala između čovjekovih nogu pri koraku od jednog metra u blizini uzemljivača koji provodi struju dozemnog kratkog spoja.



Slika 1.3. Napon koraka [2]

Kao i za napon dodira, tako i za napon koraka može se iz slike izraziti napon koraka kao razlika potencijala lijeve i desne noge.

$$U_k = U_{s1} - U_{s2} \quad (1.5)$$

, gdje je

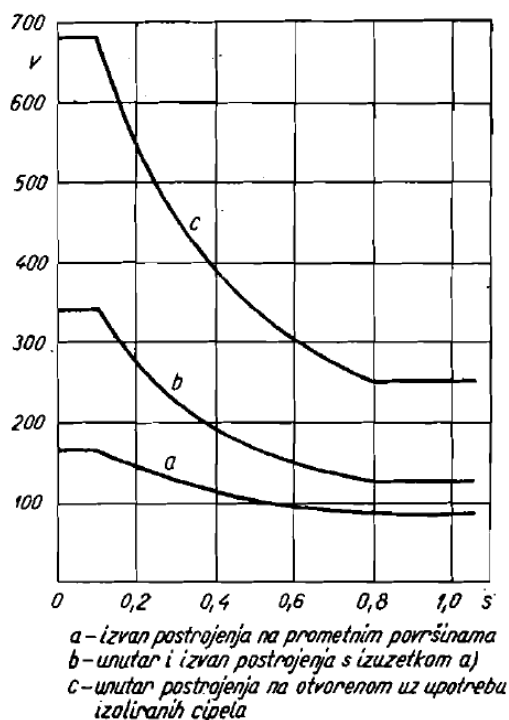
U_k – napon koraka [V],

U_{s1} – potencijal lijeve noge [V],

U_{s2} – potencijal desne noge [V].

Maksimalno dozvoljeni napon koraka određuje se iz modela koji je sličan modelu za dodirni napon, uz razliku što ovdje dodirni otpor stopala i tla čini serijski spoj otpora dvaju stopala.

$$U_k = (R_B + 2R_F) \cdot I_K \quad (1.6)$$



Slika 1.4. Dozvoljeni napon koraka prema njemačkim propisima [3]

Općenito je opasnost od previsokog napona koraka manja od opasnosti napona dodira. To se može zaključiti i iz oblika krivulje potencijala B na Slika 1.1 i Slika 1.3. Na manjim udaljenostima od uzemljivača veći je pad potencijala, odnosno veći napon. Također, što je osoba dalje od uzemljivača manji je i napon koraka.

1.3. Štapni uzemljivač

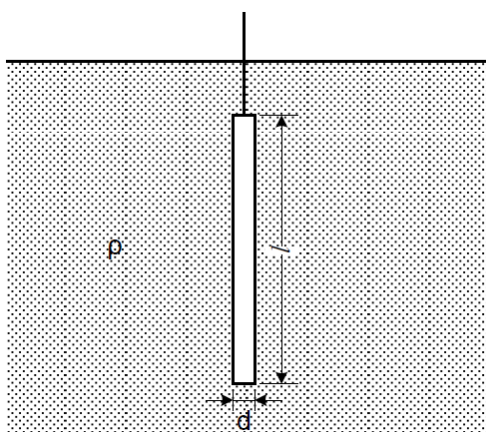
Uzemljenje se postiže uzemljivačem koji se ukopava u zemlju. Postoje različite izvedbe samog oblika uzemljivača i orijentacije njihovog polaganja u zemlju. U osnovi to je metalni vodič ili grupa vodiča u zemlji, položena okomito ili horizontalno. To mogu biti metalni vodiči, cijevi, armatura, oprema ili cijela mreža vodiča.

Glavni parametar pri odabiru uzemljivača koji će zadovoljiti zadane zahtjeve i norme je njegov otpor. Otpor je definiran kao omjer napona na uzemljivaču te struje koja prolazi kroz njega prema zemlji. Oblik i dimenzije uzemljivača utječu na veličinu otpora.

Uz dobra električne karakteristike vođenja, uzemljivač mora imati i dobru termičku otpornost te mehaničku čvrstoću. Time je određen materijal od kojeg će biti sama uzemljivačka elektroda. Ukoliko visoke struje prolaze kroz elektrodu ona se može vrlo zagrijati te isušiti okolno tlo što povećava otpor tla, a time i napon dodira. Od materijala

najčešće se koriste čelik obložen bakrom, pocinčani čelik te nehrđajući čelik. U izvedbi čelika obloženog bakrom dobivaju se karakteristike slične nadzemnim vodovima. Čelik daje mehaničku čvrstoću, dok bakar daje električni put struji te omogućuje izravni spoj žice i elektrode uzemljivača. Za većinu primjena, dovoljne dimenzije elektroda su: za promjer od 10 mm do 20 mm te za duljinu od 1.5 m do 12 m [4].

Štapni uzemljivači izvode se kao šipke ili cijevi te se polažu okomito u tlo. Jednostavnog su dizajna, jeftini, dostupni, lagano se polažu, svojom duljinom mogu doći do nižih slojeva tla manje otpornosti. Neke loše strane su visoka impulsna impedancija, nisu primjenjivi kod kamenitog tla te dolazi do visokog napona koraka pri visokim strujama kratkog spoja i manje [5].



Slika 1.5. Štapni uzemljivač [2]

Otpor ovakvog uzemljivača određen je izrazom:

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} \quad (1.7)$$

, gdje je

ρ – specifični otpor tla [Ωm],

l – duljina štapnog uzemljivača [m],

d – promjer štapnog uzemljivača [m].

S obzirom da se zbog konstantnijih prilika u tlu i veće vlažnost pri većim dubinama, uzemljivači polažu na nekoj dubini, a ne odmah s ravnine tla, gornji izraz (1.7) ne daje točan rezultat. Potrebno je uračunati i dubinu ukopa.

$$R_z = \frac{\rho}{2\pi l} \left(\ln \frac{2l}{d} + \frac{1}{2} \ln \frac{3l + 4h}{l + 4h} \right) \quad (1.8)$$

, gdje je

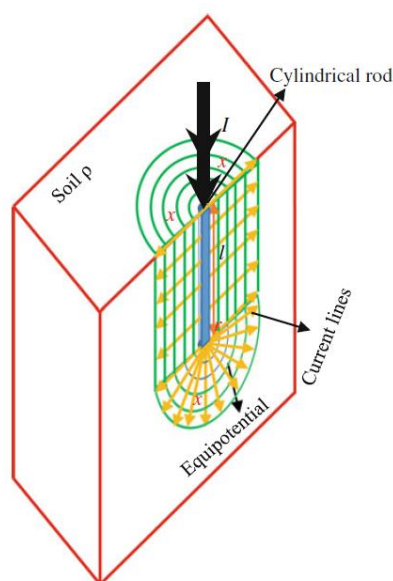
h – dubina ukopa [m].

Struja koja prolazi uzemljivačem može se podijeliti na dva dijela, na struju koja izlazi radijalno iz plašta te formira cilindričnu površinu radijusa x , te na struju koja izlazi iz baze na dnu uzemljivača te formira polusfernu površinu radijusa x , Slika 1.6. Ukupna ploština tako formiranog tijela iznosi:

$$A = \pi x^2 + \pi x^2 + 2\pi x l \quad (1.9)$$

Slijedi da je polje oko uzemljivača na udaljenosti ' x ' od njega:

$$E(x) = \rho \frac{I}{2\pi x^2 + 2\pi x l} \quad (1.10)$$



Slika 1.6. Ekvipotencijalne plohe i linije struja štapnog uzemljivača [6]

Koliko daleko od šipke će se polje širiti ovisi o parametrima tla koji će utjecati na dubinu prodiranja u tlu. Dotični parametri promatrać se kroz cijeli rad, a to su električna vodljivost i permitivnost. Kako utječu na dubinu prodiranja prikazano je na grafovima ispod u ovisnosti o frekvenciji jer se parametri mijenjaju s njom, poglavlje 2.2.1. Vidljivo je da se povećanjem vodljivosti smanjuje dubina jer se smanjuje EM energija njenom apsorpcijom i refleksijom sudaranjem sa slobodnim nabojem u tlu. Kada u materijalu postoji val električnog polja,

moгуće ga je opisati valnim brojem. Valni broj (repetencija) je fizička veličina prostorne frekvencije vala. Jednako je recipročnoj vrijednosti valne duljine [7]. Pokazuje slabljenje amplitude vala po jedinici udaljenosti te je dan s:

$$k = \sqrt{-j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)} \quad (1.11)$$

, gdje su

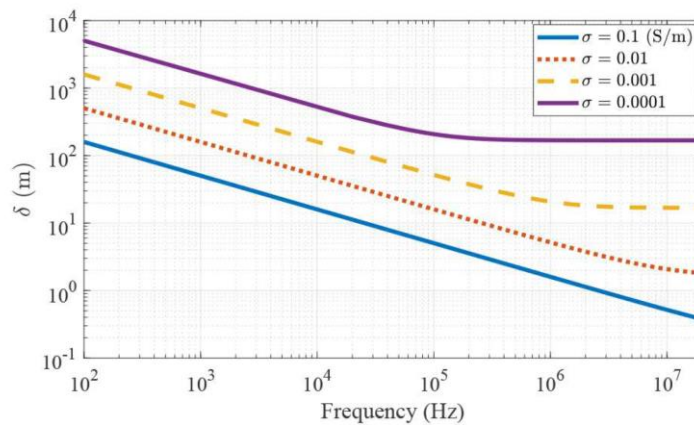
k – valni broj [m^{-1}]

ω – valna frekvencija [rad/s]

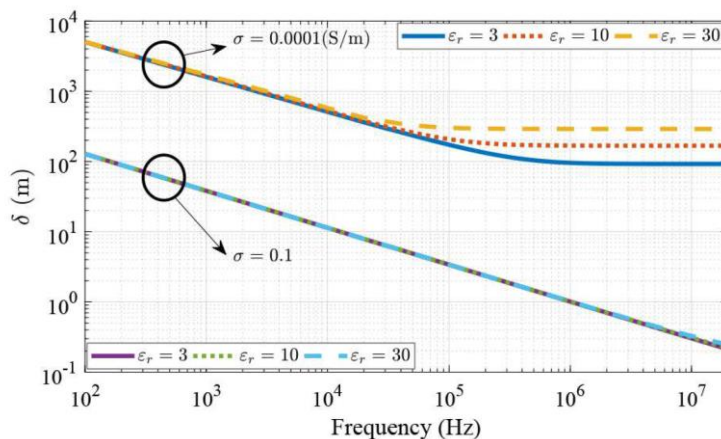
μ – permeabilnost materijala [H/m]

σ – vodljivost materijala [S/m]

ε – permitivnost materijala [F/m]



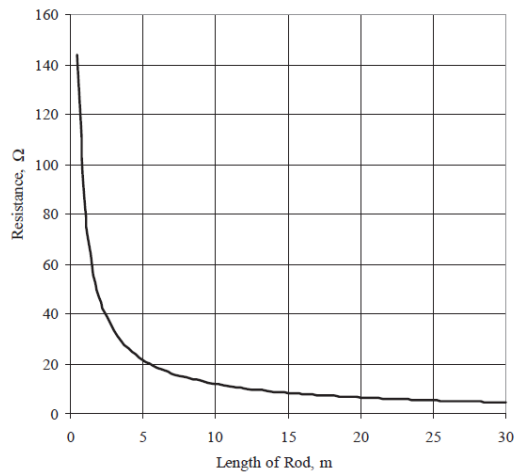
(a)



(b)

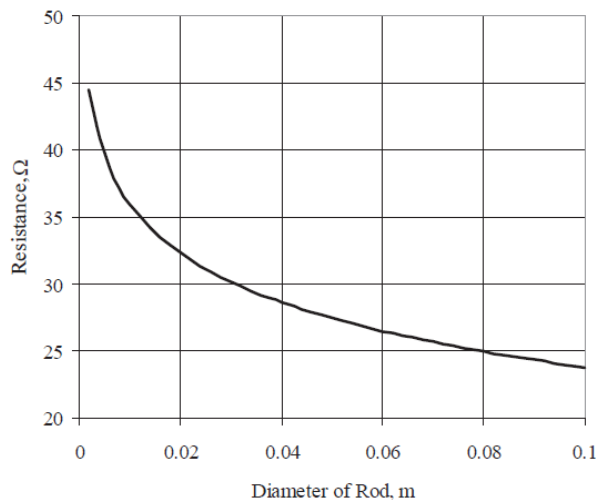
Slika 1.7. Dubina prodiranja u tlu kao funkcija frekvencije ovisno o (a) vodljivosti i (b) permitivnosti tla [8]

Duljina šipke uvelike utječe na otpor uzemljivača, Slika 1.8. Udvostručenjem njene duljine, otpor se smanji oko 44% [5].



Slika 1.8. Utjecaj duljine šipke na otpor uzemljivača [5]

S druge strane, promjena radijusa šipke ima vrlo mali utjecaj na otpor, Slika 1.9. Odabir promjera šipke ovisi o fizičkim potrebama i uvjetima kako se šipka ne bi savijala i oštetila.



Slika 1.9. Utjecaj promjera šipke na otpor uzemljivača [5]

1.4. Specifični otpor tla

Otpor uzemljivačkog sustava je skup otpora spojne žice uzemljenja, kontaktnog otpora spojne žice i uzemljivača, otpora samog uzemljivača, kontaktnog otpora uzemljivača i tla te otpora tla. Međutim, vrijednost otpora tla je mnogo veća od ostala četiri te ih se zanemaruje. Iz tog razloga potrebno je poznavati otpornost tla u koju se polaže uzemljivač.

Tlo je složeni sustav od krutih, tekućih i plinovitih faza. Kruti dio tvori strukturu tla čije pukotine ispunjavaju tekućine i plinovi. Zbog takve strukture računski dobivene vrijednosti otpora tla su manje od mjerenih jer kontakt uzemljivača i tla nije po cijeloj površini, već više točkaste prirode. Udaljavanjem od uzemljivača povećava se otpor tla te se uzima da je ukupni otpor obuhvaćen prostorom radijusa 7.6 metara (25 ft) od elektrode duge 3 metra (10 ft) [9].

Vodljivost, odnosno specifični otpor kao recipročna vrijednost definira otpor tla. Tlo je polivalentan elektrolit zbog naboja i iona koje privlači. Vodljivosti tla pridonose nabijene čestice tla (fenomen zvan vodljivost koloidnih čestica) i otopljeni ioni.

Na vrijednost specifičnog otpora utječe nekoliko faktora:

- vrsta tla,
- prisutnost soli u tlu,
- vlaga,
- temperatura,
- frekvencija.

U daljnjim razmatranjima fokus će biti na utjecaju frekvencije. O ostalim faktorima se govorilo u seminaru [10] te ih se sada neće obrađivati.

2. Utjecaj frekvencije

2.1. Impedancija uzemljivačkog sustava

Kod dimenzioniranja uzemljivačkog sustava ne gledajući optimiranje ekonomskog troška, cilj je napraviti sustav što manjeg otpora za disipaciju struja uz zadovoljenje zakonski propisanih sigurnosnih veličina. Određeni faktori utječu na otpor sustava. Osim izvedbe uzemljivača, utječu i svojstva tla te valni oblik injektirane struje. Izvedba uzemljivača, koja može biti štapna, pločasta, polusferna, sferna, mrežasta, vertikalno ili horizontalno postavljena, definirat će oblik formule otpora. Svojstva tla određuju specifičnu otpornost sustava, dok injektirana struja određuje model električnog kruga uzemljenja.

Uzimanjem u obzir utjecaj frekvencije, do sada proučavani statički model postaje manje koristan. Uzemljenje je uobičajeno dizajnirano za frekvencije sustava od 50, odnosno 60 Hz na koje je čovjek i više zdravstveno ugrožen. Pri visokim frekvencijama, što je od interesa u ovom radu, više se ne može zanemariti postojanje vrtložnih struja i struja pomaka, skin efekta, ionizacije tla te promjene parametara tla s frekvencijom, no i u takvim uvjetima sustav mora biti siguran i efikasno provoditi struje prema tlu. Nepotpuna istraženost ovih uvjeta vidljiva je i u standardima koji definiraju granice iznosa struje koje mogu proći kroz ljudsko tijelo bez ugrožavanja života samo u frekventnom spektru od 15 do 100 Hz.

Parametri koji moraju biti uključeni pri proučavanju novog dinamičkog visokofrekventnog modela su induktivitet uzemljivačke šipke, kapacitet tla te promjene otpora uzemljivača i tla. Prolaskom AC struje vodičem (u radu uzemljivačkom šipkom) induktivitet se protivi njenoj promjenjivoj prirodi. To protivljenje opisuje se induktivnom reaktancijom X_L koja ovisi o frekvenciji:

$$X_L = 2\pi fL \quad (2.1)$$

, gdje je:

L – impedancija uzemljivača [H],

f – frekvencija struje [Hz].

Sam induktivitet šipke ovisi o obliku, odnosno modelima šipke, te materijalu od kojeg je rađena, točnije njegovoj permeabilnosti μ . Za promatrani štapni uzemljivač predlaže se iduća jednadžba [11]:

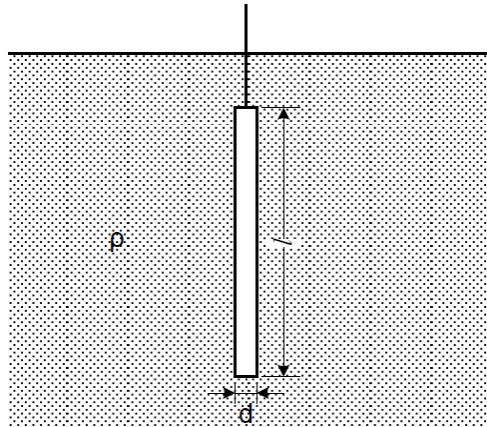
$$L = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \log \frac{2l}{r} \quad (2.2)$$

, gdje je:

l – duljina vodiča [m],

r – radijus vodiča [m],

μ – permeabilnost materijala vodiča [H/m].



Slika 2.1. Štapni uzemljivač [2]

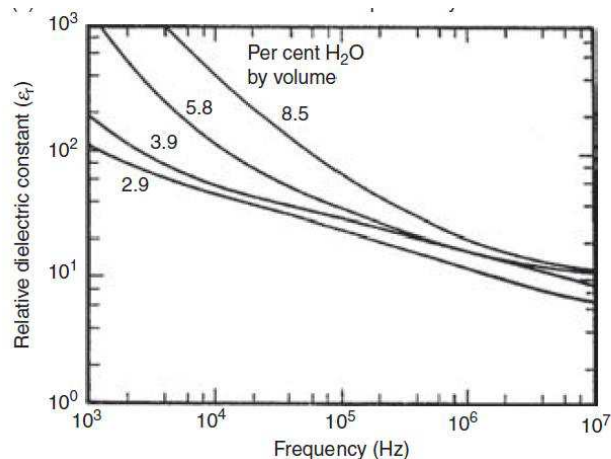
Kapacitet tla proizlazi od šupljina u tlu koje su ispunjene zrakom i ponašaju se kao kapaciteti. Vodljivost šupljina je mala i slabo ovisna o temperaturi. Povećanjem frekvencije impedancija kapaciteta se smanjuje (2.3) što uzrokuje smanjenje otpornosti tla. Na frekvencijama iznad 10 kHz moguće je smanjenje i od preko 50% iznosa impedancije.

$$X_c = \frac{1}{2\pi f C} \quad (2.3)$$

Za kapacitet štapnog uzemljivača vrijedi [11]:

$$C = \frac{2\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l}{\log \frac{2l}{r}} \quad (2.4)$$

No i relativna dielektrična permitivnost je frekvencijski ovisna, a uz to i o vlažnosti tla. Što se tiče utjecaja vlage, vrijednost dielektrične permitivnosti može iznositi oko 3 pri suhom tlu pa sve do 30 pri velikoj vlažnosti.



Slika 2.2. Vrijednost relativne dielektrične permitivnosti ovisno o frekvenciji i vlažnosti [12]

Osim pojave impedancije u sustavu, odziv na frekvenciju popraćen je i promjenama u ponašanju uzemljivačkog vodiča (šipke) te ponašanju tla. Kod tla to su promjena parametara tla s frekvencijom i ionizacija tla, a kod vodiča skin efekt, propagacijski efekti i struja pomaka [13]. Razumijevanje i modeliranje navedenih promjena važno je u raznim primjenama kao što su gromobranska zaštita, telekomunikacija, prijenos električne energije, elektromagnetska kompatibilnost, itd.

2.2. Utjecaj frekvencije na ponašanje tla

2.2.1. Promjena parametara tla

Kada se govori o frekvencijskoj ovisnosti, primarno se misli na promjenu električnih parametara tla s frekvencijom. Ta ovisnost poznata je već dugo vremena temeljem laboratorijskih mjerenja. Njenim zanemarenjem nastaju velike pogreške pri proračunima s visokim frekvencijama, ali nema utjecaja ispod 10 kHz te u tlima niske otpornosti [14].

Električni parametri tla koje je potrebno promatrati su električna vodljivost (σ) i električna permitivnost (ϵ). Magnetska permeabilnost (μ) smatra se konstantnom, jednakom permeabilnosti vakuuma μ_0 .

Vodljivost je mogućnost materijala da prenosi električnu energiju. Predstavlja recipročnu vrijednost otpornosti materijala. Time je povezano i s gubitcima zagrijavanja prilikom prijenosa. Kod niskih (radnih) frekvencija opisano je s σ_0 kao vodljivost zbog slobodnih iona i elektrona te je realan broj.

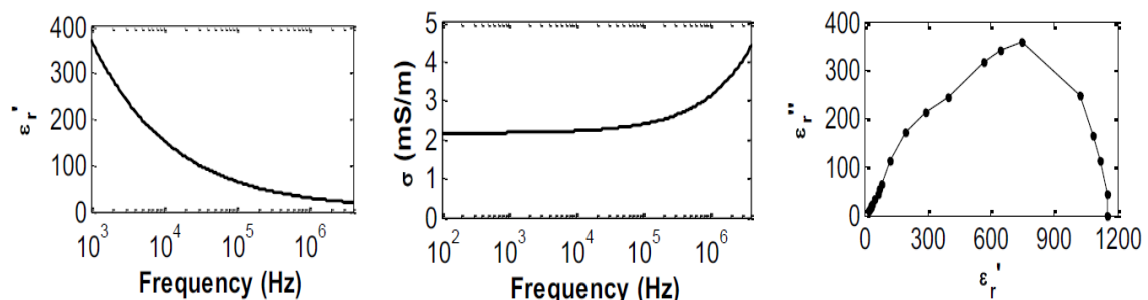
Permitivnost je mjera mogućnosti materijala da se protivi djelovanju električnog polja. Vrijednost relativne permitivnosti u rasponu je od 3 za suho tlo pa do 30 za vlažno tlo.

Kako bi se pojednostavilo definiranje propagacije valova, uvodi se kompleksna permitivnost koja će opisati svojstva materijala.

$$\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon'' = \varepsilon - j \frac{\sigma}{\omega\varepsilon} \quad (2.5)$$

Realni dio predstavlja sposobnost materijala da bude polariziran te sprema električnu energiju. Dok je imaginarni dio mjera gubitaka tijekom polarizacije i prema tomu se naziva faktor gubitaka. Minus u jednadžbi (2.5) dolazi od vremenske ovisnosti elektromagnetskog polja $e^{2j\pi ft}$, u slučaju da je ovisnost $e^{-2j\pi ft}$ umjesto minusa bio bi plus.

Razni procesi polarizacije se događaju u tlu ovisno o iznosu frekvencije. Razlikujemo električnu, ionsku, dipolarnu te međufaznu polarizaciju. Rastom frekvencije, procesi polarizacije koji se događaju, a imaju veću inerciju ne mogu pratiti brze promjene električnog polja te se smanjuje jakost polarizacije (ε'), a istovremeno se povećavaju gubitci (ε''). Tijekom svake polarizacije dosegne se neka vršna vrijednost od ε'' , apsorpcijska vršna vrijednost, a frekvencija na kojoj se ona dogodi relaksacijska frekvencija. Tlo nehomogeno po prirodi, u svakom prisutnom materijalu pri određenim frekvencijama doživljava polarizaciju te ima mnogo relaksacijskih frekvencija koje su relativno jednoliko raspodijeljene čime kretanje ε' poprima kontinuirani te blaži pad, a ε'' više vršnih vrijednosti [13]. Grafički prikaz navedenih pojava moguć je jednostavnim grafom u ovisnosti o frekvenciji ili često u dielektrici primjenjivim Cole-Cole dijagramom. Jedan od takvih prikaza vidljiv je na slici ispod za realno tlo na temelju eksperimentalni rezultata.



Slika 2.3. Frekvencijska ovisnost kompleksne permitivnosti [13]

Na frekvencijama do 1000 GHz disipacija u tlu je ili translacijska (struja) ili vibracijska (vibracija dipola) te se imaginarni dio može dodatno rastaviti na dva člana:

$$\varepsilon_d + \frac{\sigma}{2\pi f \varepsilon} \quad (2.6)$$

, gdje prvi član predstavlja disipaciju struje zbog vibracija, a drugi član zbog vođenja struje. Pri DC vođenju te do translacijske frekvencije f_t , dominantan član je onaj vođenja struje. Moguće je odrediti tu frekvenciju s:

$$f_t = \frac{\sigma}{2\pi \varepsilon \varepsilon_d} \quad (2.7)$$

Za ukupnu gustoću struje prema proširenom Amperovom zakonu (4. Maxwelllova jednažba) vrijedi:

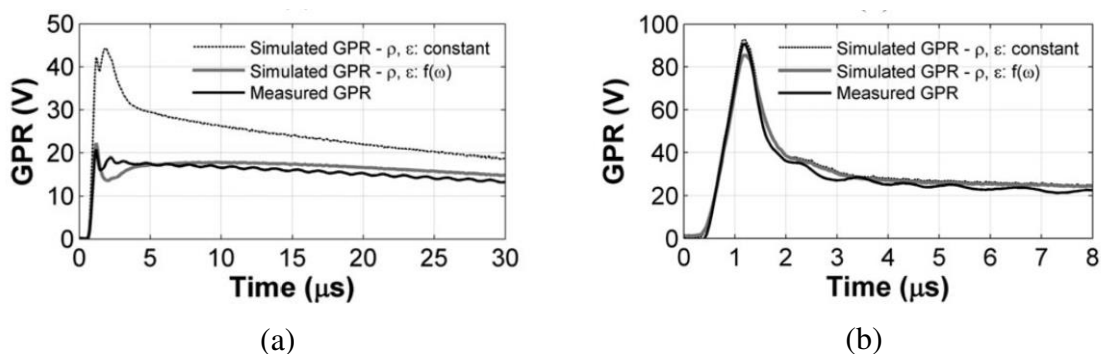
$$\vec{\nabla} \times \vec{H} = \sigma_0 \vec{E} + j\omega \varepsilon \vec{E} \quad (2.8)$$

Kada se u (2.8) uvede kompleksna permitivnost (2.5) dobiva se:

$$\begin{aligned} \vec{\nabla} \times \vec{H} &= (\sigma_0 + \omega \varepsilon'') \vec{E} + j\omega \varepsilon' \vec{E} = \\ &= \sigma \vec{E} + j\omega \varepsilon' \vec{E} \end{aligned} \quad (2.9)$$

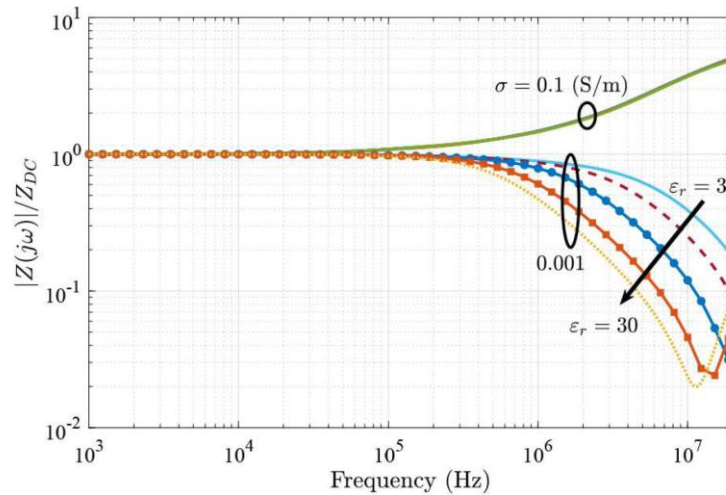
, gdje je σ efektivna vodljivost koja ima konstantnu vodljivost σ_0 te frekvencijski ovisnu komponentu $\omega \varepsilon''$. Potvrđuje se što se vidi na Slika 2.3 da vodljivost raste s frekvencijom. Iz svega navedenog primjetna je ne samo ovisnost o frekvenciji, već i međuovisnost električnih parametara. Ako s frekvencijom pada ε' , rast će ε'' što će onda povećati i σ . Fizikalna međuovisnost ε' i ε'' objašnjena je Kramer-Kronigovim relacijama.

Zanemarenjem ove ovisnosti kod tla srednje i visoke otpornosti nastaju velike pogreške u proračunima. Otpornost tla znatno pada te je i GPR manji. Sa sigurnosnog aspekta ove greške su na neki način pozitivne jer se ugrađuje predimenzionirani sustav koji stvara bolje električne prilike. Naravno s onog ekonomskog aspekta to su dodatni troškovi.



Slika 2.4. Usporedba GPR-a u simuliranim modelima s konstantnim i promjenjivim električnim parametrima te stvarnim mjerenim podacima za (a) slabo i (b) dobro vodljivo tlo [15]

Promjena permitivnosti nema značajan utjecaj na impedanciju u vodljivim tlima (10 i 100 Ωm), no kod tla veće otpornosti iznad frekvencije od 10-ak kHz veća permitivnost može smanjiti impedanciju i za 50% zbog kapacitivnih efekata. Impedancija pada do frekvencije od nekoliko MHz nakon čega se događaju oscilacije koje su veće s većom permitivnosti. Je li utjecaj permitivnosti značajan pokazuje imaginarni dio valnog broja u jednadžbi (1.11) [8].



Slika 2.5. Značaj permitivnosti tla kod tla različitih otpornosti [8]

Na temelju raznih laboratorijskih ispitivanja dane su empirijske formule frekvencijske ovisnosti parametara, npr. Longmire i Smith; Messier; Portela; te Alipio i Visacro [14]. CIGRE C4.33 preporuča korištenje idućih dviju formula, prva (2.10) za otpornost tla te drugu (2.11) za permitivnost:

$$\rho(f) = \rho_0 [1 + 4.7 \cdot 10^{-6} \cdot \rho_0^{0.73} \cdot f^{0.54}]^{-1} \quad (2.10)$$

$$\epsilon_r(f) = 9.5 \cdot 10^4 \cdot \rho_0^{-0.27} \cdot f^{-0.46} + 12 \quad (2.11)$$

2.2.2. Ionizacija tla

Ionizacija tla nije povezana s frekvencijom na način da postoji neka ovisnost o veličini. Ovaj efekt se navodi jer, kao što će kasnije biti pokazano u poglavlju 2.8, impulsne struje koje uzrokuju ovu pojavu imaju visokofrekventni spektar. Pojava nastaje kada impulsna struja velike jakosti dođe kroz uzemljenje u tlo te stvori dovoljno jako prijelazno električno polje koje će napraviti proboj materijala tla i pretvoriti ga u stanje plazme.

Proboj će se dogoditi samo u ograničenoj zoni oko šipke gdje električno polje dosegne kritičnu jakost, E_c . U toj zoni pretpostavlja se da je otpornost nula, apsolutna vodljivost,

čime se poboljšava ponašanje uzemljenja i značajno smanjuje napon koraka [16]. Točan oblik regije teško je znati, no moguća su proučavanja s X-ray filmom koji hvata X-zrake iz plazme [17].

Razni eksperimenti i mjerenja dali su iznos kritičnih jakosti polja određenih vrsta tla.

Tablica 2.1. Vrijednosti kritične jakosti polja za neka vrsta tla [17]

Istraživanje	tlo	E_c [kV/cm]
He, et. al.	zemlja	3.41
	glina	5.04
	pijesak	9.91
Oettle	mokro tlo	18.5

Iz Tablica 2.1. vidljivo je da vlažno tlo ima manji E_c te je ionizacija snažnija. Kod tla s većim česticama postoje veće šupljine zraka te je ionizacija također izraženija.

Ionizaciju tla komplicirano je proučavati zbog njene strukture. Analitičke metode su teško rješive te su moguće samo numeričke metode i simulacije. Kada se rade simulacije frekvencijski ovisnog odziva tla zanemaruje se ionizacija jer je teško istovremeno uzeti u obzir sve utjecaje.

2.3. Utjecaj frekvencije na ponašanje uzemljivačke šipke

2.3.1. Skin efekt

Osim pojave reaktancije s frekvencijom, odnosno izmjeničnom strujom, dodatno se povećava i efektivni otpor zbog skin efekta.

Kada DC struja teče vodičem ona prolazi njegovim cijelim presjekom. S druge strane, izmjenična struja ima tendenciju prolaska uz površinu vodiča izbjegavajući središte. Time se ustvari želi prikazati nejednolika distribucija gustoće struje s porastom frekvencije. Efektivno se smanjuje površina presjeka kojim teče struja, a posljedično povećava otpor kao što se vidi iz opće jednadžbe (2.12) za otpor vodiča:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (2.12)$$

,gdje je:

ρ – specifična otpornost materijala vodiča [Ωm],

l – duljina vodiča [m],

S – površina presjeka vodiča [m^2].

Ovu pojavu moguće je objasniti indukcijom elektromotorne sile. Kako izmjenična struja prolazi vodičem, magnetska indukcija se mijenja u vremenu što stvara elektromotornu silu. Ako se površina vodiča podijeli koncentričnim kružnicama jednakih presjeka, površina elementarnog vodiča bliže centru vodiča biti će veća, a time i tok magnetske indukcije. Veći tok magnetske indukcije uzrokovat će i veću induciranu struju koja se protivi početnoj struji kroz vodič. Konačno gustoća struje se smanjuje.

Što frekvencija ima veću vrijednost efekt je izraženiji. Struja će svoj tok limitirati sve više uz samu površinu vodiča, iščezavajući iz unutrašnjosti vodiča i otpor raste. Na frekvencijama većim od 1 MHz debljina površine kroz koju teče struja manja je od milimetra [18]. Na slici ispod može se vidjeti promjena površine toka struje s frekvencijom.



Slika 2.6. Dostupan poprečni presjek toku struje [19]

Efekt je uz to ovisan i o presjeku vodiča, permeabilnosti te otpornosti materijala vodiča. Što je veći presjek, efekt je izraženiji. Isto se događa uz veću permeabilnost zbog većeg ulančanog toka, a manje je izraženo s većom otpornošću pošto je tada manji udio induktivnog otpora u ukupnoj impedanciji [20].

Gustoća struje eksponencijalno pada od ruba vodiča. Udaljenost od površine vodiča na kojoj će teći samo $1/e$ vrijednosti gustoće struja na površini naziva se dubina prodiranja (*eng. Skin depth*). Što je ona manja, efekt je izraženiji.

$$\delta = \sqrt{\frac{\rho}{2f\mu}} \quad (2.13)$$

, gdje je:

μ – magnetska permeabilnost vodiča [H/m],

f – frekvencija struje [Hz].

Koliko će otpor iznositi može se aproksimirati s idućom formulom za visoke frekvencije (veće od 1 MHz) [19]:

$$R_{VF} = R_{DC} \cdot k\sqrt{f} \quad (2.14)$$

, gdje je:

R_{DC} – otpor vodiča pri 0 Hz (DC struja) [Ω],

k – faktor debljine žice [#],

f – frekvencija u MHz-ima [MHz].

Što se tiče samog faktora debljine žice k , on je veći kod debljih žica. To kao posljedicu ima da deblje žice, koje početno imaju manji otpor, pri svim frekvencijama imaju izraženiji efekt povećanja otpora. U tablici može se vidjeti aproksimativne vrijednosti faktora za različite debljine okruglih vodiča.

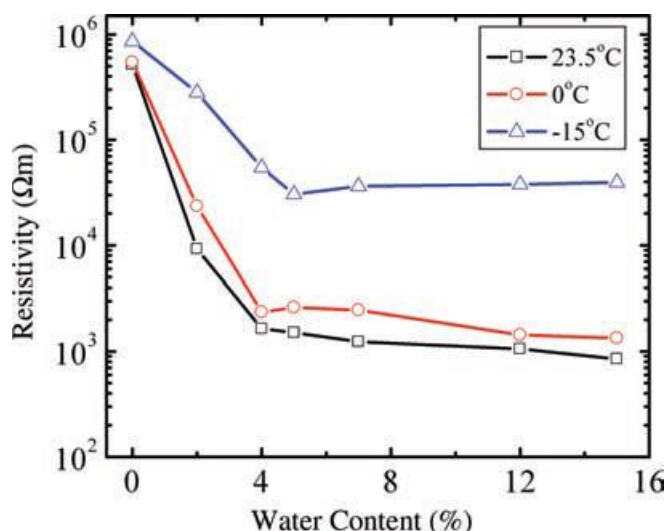
Tablica 2.2. k faktor ovisno o debljini vodiča [19]

Debljina žice [mm]	k faktor [#]
11.68	124.5
7.0	69.8
3.2	27.6
0.7	6.86

Također postoji još jedna empirijska formula za približni otpor zbog skin efekta [20]:

$$R_{AC} \approx R_{DC} \left(1 + \frac{(2f\mu)^2}{192 \cdot R_{DC}^2} - \frac{(2f\mu)^4}{46080 \cdot R_{DC}^2} \right) \quad (2.15)$$

Povećanjem otpora nastajat će i veći gubici u obliku topline $P_{loss} = I^2 R$ te isušenje okolnog tla. U prethodnom radu već je objašnjeno kako količina vlage u tlu utječe na otpornost tla, odnosno otpor uzemljenja. Na donjem grafu pokazana je ta ovisnost gdje je vidljiv izrazit rast otpornosti kod suhog tla.



Slika 2.7. Ovisnost otpornosti tla s količinom otopljene vode [21]

2.3.2. Struja pomaka

Tipično govoreći o struji podrazumijeva se struja vođenja u vodiču uzrokovana kretanjem naboja. Kod izmjeničnih pojava vremenski promjenjivo električno polje uzrokuje dodatnu struju, struju pomaka (*eng. displacement current*) danu jednačbom (2.16).

$$I_D = J_D S = S(\partial(E\varepsilon)/\partial t) \quad (2.16)$$

, gdje je:

I_D – struja pomaka [A],

J_D – gustoća struje pomaka [A/m²],

E – električno polje u kondenzatoru (šupljini) [V/m],

S – površina kondenzatora [m²],

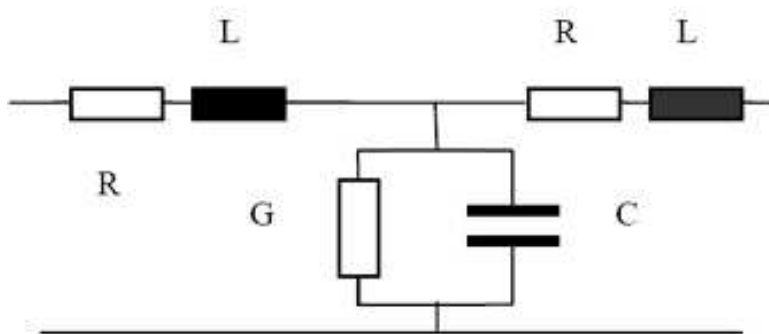
ε – električna permitivnost kondenzatora [F/m].

Ne karakterizira ju kretanje naboja, a ima ključnu ulogu u propagaciji EM zračenja kroz prostor. Kako tlo nije homogeno, već ima čestice različitih veličina, između kojih se nalaze i šupljine ispunjene zrakom koje se ponašaju kao kapaciteti. Širenjem naboja u tlu ti

kapaciteti se nabijaju i mijenjaju električno polje. Vodljivost šupljina je mala i slabo ovisna o temperaturi. Povećanjem frekvencije impedancija kapaciteta se smanjuje što uzrokuje povećanje struje pomaka i smanjenje otpornosti tla. Prevladavajuća struja postaje struja pomaka iz tih šupljina.

2.4. Model električnog kruga frekvencijski ovisnog uzemljenja

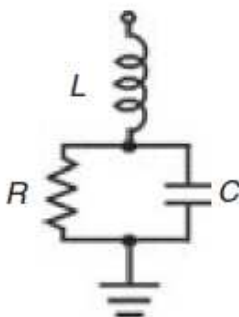
S obzirom da se mnoge veličine mijenjaju s valnim oblikom injektirane struje, impedanciju takvog promjenjivog sustava nazivamo tranzijentnom. Za jednostavni štapni uzemljivač kakav se koristi u radu, u [22] dan je visokofrekventni T-model električnog kruga.



Slika 2.8. Model električnog kruga uzemljivačkog sustava za visoke frekvencije [22]

Elementi na Slika 2.8. redom predstavljaju serijski spoj otpora uzemljivačke šipke i ukupne impedancije, paralelu provodljivosti i kapaciteta tla. Serijski krug se razdvaja na segmente čija se veličina mijenja s prodorom struje duž šipke promjenom frekvencije. Ovakav model je dobar u slučaju procjene impedancije, no kod promatranja ostalih električnih veličina kao što su napon dodira i koraka, profil potencijala tla, raspodjela gustoće struje nema primjene. Obzirom da je valna duljina obrnuto proporcionalna frekvenciji, kod izrazito visokih frekvencija ona postaje sumjerljiva dimenzijama uzemljivačkog sustava te je potrebno koristiti distribuirane parametre [22].

S druge strane, [12] daje nešto jednostavniji model prikazan na Slika 2.9. Posjeduje induktivitet u seriji s paralelom otpora i kapaciteta tla. Karakteristična impedancija takvog sustava dana je jednadžbom:

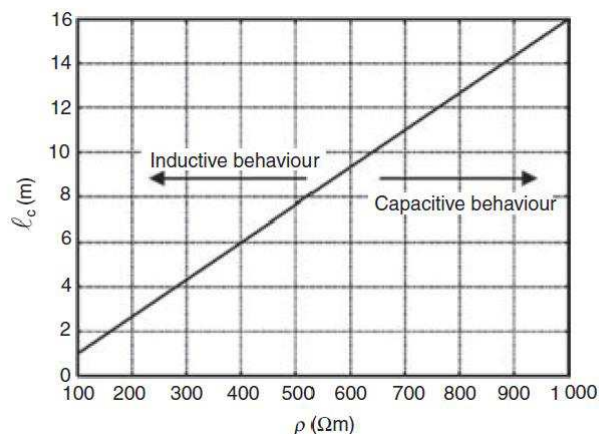


Slika 2.9. Model električnog kruga uzemljivačkog sustava za visoke frekvencije [12]

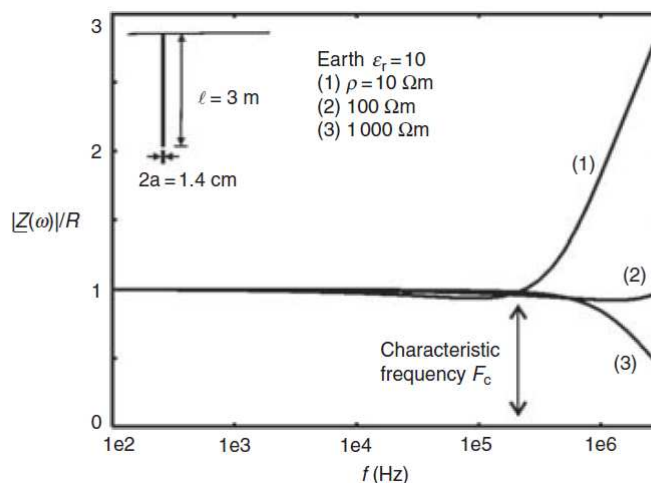
$$Z_0 = \frac{\log \frac{2l}{r}}{2\pi} \sqrt{\frac{j\omega\mu\rho}{(1 + j\omega\varepsilon\rho)}} \quad (2.17)$$

2.5. Karakteristična frekvencija

Utjecaj frekvencije je više-manje konstantan do određenog iznosa frekvencije, a impedancija ima otporni karakter jer je moguće zanemariti pad napona zbog kapacitivnih i induktivnih struja. Vrijednost do koje vrijedi takvo ponašanje naziva se karakteristična ili prekidna frekvencija, f_c . Iznad ove vrijednosti impedancija će biti induktivnog ili kapacitivnog karaktera ovisno o duljini elektrode i vodljivosti tla. Što je duljina elektrode veća, veći su i kapacitet i induktivitet čime se smanjuje struja odvoda i karakteristična frekvencija, vidljivo na Slika 2.12. Dulja elektroda imati će i veću impedanciju čime se pogoršava odvođenje struje i učinkovitost sustava. S druge strane većom vodljivošću tla manja je karakteristična frekvencija. Dodatna stvar je da kod više vodljivih tla na višim frekvencijama dominantan je induktivitet elektrode, a kod slabije vodljivih tla kapacitet tla, što je prikazano na Slika 2.10.



Slika 2.10. Područja induktivnog i kapacitivnog karaktera impedancije ovisno o duljini šipke i vodljivosti tla [12]



Slika 2.11. Tipična ponašanja frekvencije na višim frekvencijama ovisno o otpornosti tla [12]

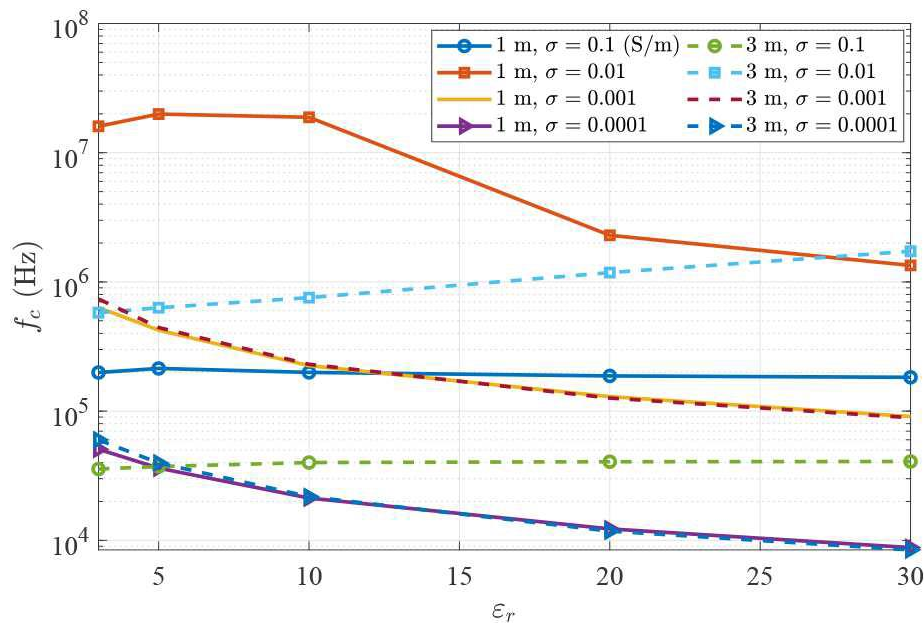
Kako je duljina šipke uzemljena jedan od parametara koji definira karakterističnu frekvenciju, prilikom njenog odabira moguće je odrediti potrebnu duljinu ovisno o željenom frekvencijskom ponašanju. Relacija koja to definira glasi (2.18) i ovisi o otpornosti tla u koju se poliježe [12].

$$l = 0.6(\rho/f_c)^{0.43} \quad (2.18)$$

, gdje je:

ρ – otpornost tla [Ω/m],

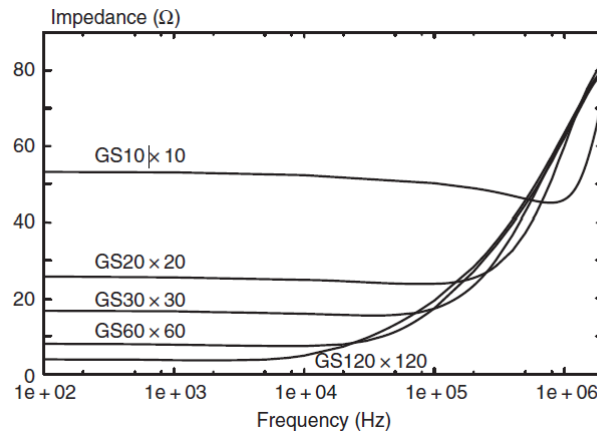
f_c – željena karakteristična frekvencija [Hz].



Slika 2.12. Ovisnost karakteristične frekvencije o dielektričnoj konstanti i duljini šipke [8]

Uobičajeno je da se ugrađuju šipke veće duljine, čime se postiže manji otpor u stacionarnom stanju i pri niskim frekvencijama, no pri visokim frekvencijama sustav dobiva induktivni karakter koji pogoršava ponašanje povećanjem impedancije.

Kako se vidi i u [10] kada se napravi cijela mreža s vodoravno i okomito postavljenim uzemljivačima otpor se smanji, to dolazi iz idućeg razloga. Ugradnjom većih sustava primjerice mreže uzemljivača početno će zbog veće zauzete površine za disipaciju struja i impedancija biti manja. Kasniji problem nastaje što veći sustavi imaju manju karakterističnu frekvenciju i impedancija kreće rasti na nižim frekvencijama te je u konačnici i veća od onog sustava manje površine, prikazano Slika 2.13. Treba uzeti u obzir i poziciju na mreži gdje se spaja spojna žica. Najbolja solucija je spajanje u centru. Razlog tomu je što duljina dijagonale od mjesta spoja do nasuprotnog kuta postaje jedna od karakterističnih dimenzija. Prema tome dijagonala je duplo manja ako je spoja na centru, nego na rubu i sustav ima veću karakterističnu frekvenciju [12].



Slika 2.13. Utjecaj veličine mreže na tranzijentnu impedanciju [12]

U simulacijama frekvencije koje će biti od važnosti su one veće od 100 kHz jer ispod te vrijednosti uzemljenje ima čisto otporni karakter.

2.6. Određivanje vrijednosti impedancije

Vrijednosti impedancija dobit će se iz omjera vršnih vrijednosti napona i struje. Struja je ona injektiranog impulsa s promjenjivom karakteristikom, dok je napon električni potencijal na mjestu spoja spojne žice i uzemljiivača.

$$Z = \frac{\max(v(t))}{\max(i(t))} = \frac{V_{max}}{I_{max}} \quad (2.19)$$

Ideja je postići što manju vrijednost. Da bi se moglo reći da je neki sustav dobro uzemljen IEEE i IEC stavljaju granicu na 10 Ω za zaštitu od groma i ispod 0.1Ω za mjesto sa zaštitnim uređajem za velike struje kvara [23].

2.7. Impulsni koeficijent

Kako bi se odredila efikasnost uzemljenja i pri frekvencijskom odzivu uvedena je veličina impulsni koeficijent (efikasnost). Definiran je kao omjer tranzijentne impedancije pri određenoj visokoj frekvenciji i otpora uzemljenja pri niskoj frekvenciji [15].

$$I_c = Z_P/R_{NF} \quad (2.20)$$

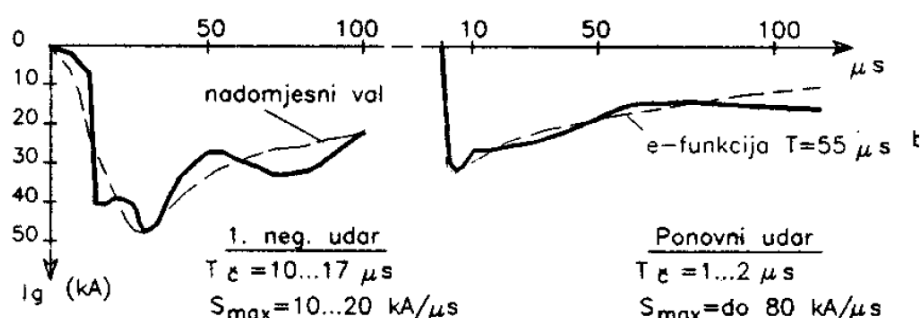
Omjer govori koliko se impedancija promijenila pojavom impulsne struje (takve struje imaju visokofrekventni spektar, poglavlje 2.8) u odnosu na otpor pri radnoj frekvenciji.

2.8. Uzroci pojave viših harmonika

U normalnom pogonu elektroenergetskog sustava cilj je održavati frekvenciju konstantnom, odnosno u vrlo uskom području sa što manjim odstupanjima od nazivne vrijednosti. U europskom sustavu ta frekvencija iznosi 50 Hz, a dopušteno odstupanje je od 0,1%. Sustav je modeliran tako da određenim radnja, recimo aktiviranjem proizvodne rezerve ili isključenjem proizvodnje, regulira jednakost proizvodnje i potrošnje. Pojava visokih frekvencija u sustavu događa se u iznimnim situacijama kao što su atmosfersko pražnjenje, sklopne radnje, kratki spoj. Struja navedenih pojava nije kontinuirana izmjenična, već impulsna što znači da iznenadno naraste do određene vrijednosti nakon čega opada. Tako brza promjena, govori se o mikrosekundama, ustvari je izmjenična pojava visoke frekvencije. Fourierovom transformacijom strujnog vala, prebacivanjem iz vremenske u frekvencijsku domenu, moguće je izvući njegov frekvencijski spektar. Nakon pražnjenja struje u tlo, što traje također relativno kratko, a vrijeme trajanja ovisi o ponašanju šipke, sustav uzemljenja se ponovno može proučavati niskofrekventnim (DC) modelom [24]. U nastavku prikazane su osnovni valni oblici visokofrekventnih struja i njihovi frekvencijski spektri.

2.8.1. Atmosfersko pražnjenje

U grmljavinskom oblaku negativne čestice skupljaju se na donjoj strani zbog veće mase, a pozitivne su na gornjem dijelu. Na pojedinim mjestima nastat će područje koje sadrži veću količinu naboja. Taj naboj se izbija i nastaje munja. Najčešća su pražnjenja negativnog polariteta, nakon kojih može uslijediti ponovni udar. Pražnjenja pozitivnog polariteta su rijetka, no može doći do velike koncentracije pozitivnog napona na tlu koji će prouzročiti pozitivno uzlazno izbijanje. 90% svih izbijanja je međusobno između oblaka, a samo 10% između oblaka i zemlje i oni su od interesa [25].



Slika 2.14. Oscilogram tipične struje munje [25]

Razlikujemo prvi udar te uzastopni (ponovni) udar. Razlikuju se u parametrima jer već postoji ionizirani kanal kroz zrak. Struju groma moguće je opisati Heidlerovom funkcijom [14]:

$$I(t) = \frac{I_0}{\eta} \frac{(t/\tau_1)^n}{1 + (t/\tau_1)^n} e^{-t/\tau_2} \quad (2.21)$$

, gdje je

I_0 – amplituda struje munje [A]

τ_1 – vrijeme trajanja čela [μ s]

τ_2 – vrijeme pada hrpta [μ s]

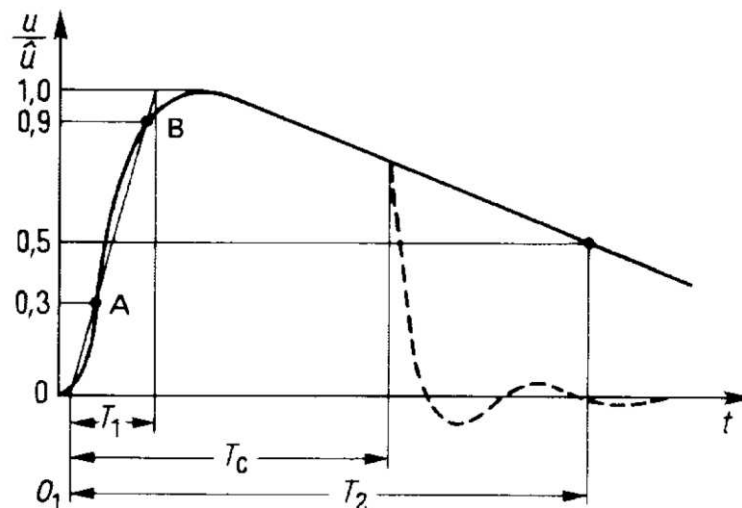
η – korektivni faktor amplitude [#]

$$\eta = e^{-\left(\frac{\tau_1}{\tau_2}\right)\left(n\frac{\tau_2}{\tau_1}\right)^{\frac{1}{n}}} \quad (2.22)$$

n – faktor strmine [#]

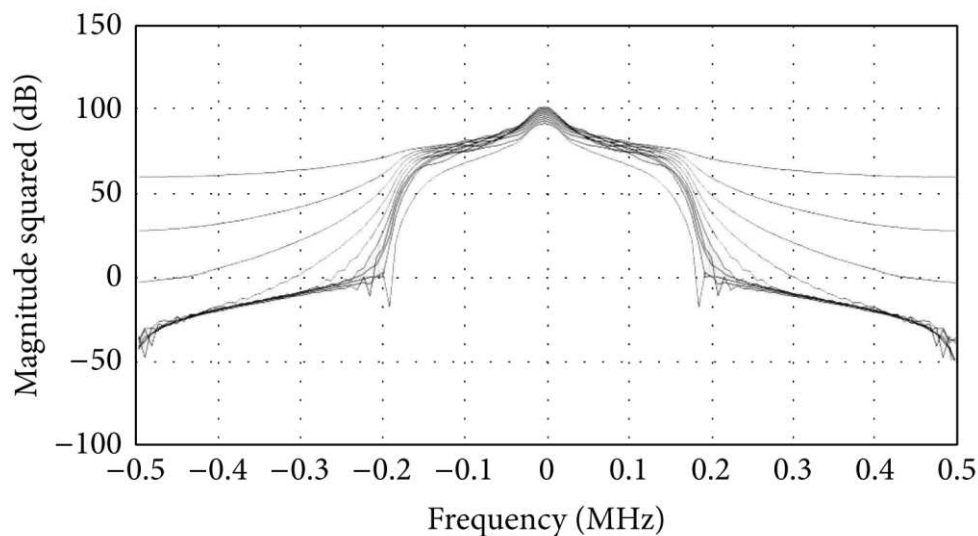
Prvi udar ima mnogo veću amplitudu, nekoliko desetaka kiloampera te je trajanje čela 10-ak mikrosekundi. Uzastopni udar ima manju amplitudu do 10-ak kiloampera, no maksimum se postiže u još kraćem vremenu od 0.5 do 2 mikrosekunde. Strmina valnog oblika presudna je za frekvenzijski spektar, što je ona veća, viša je i frekvencija. Srednja vrijednost strmine prvog udara je 12 kA/ μ s, dok uzastopnog dosta veće oko 40 kA/ μ s te prema tome ima višu glavnu frekvenciju [24].

Udarom munje na vodiču pojavit će se atmosferski prenapon. To je vrsta prijelaznog prenapona s brzim porastom čela. Karakterizira ga postizanje amplitude nakon kratkog vremena, odnosno trajanje čela od 0,1 μ s $<T < 20 \mu$ s, i zatim prigušenje s trajanjem hrpta manjim od 300 μ s. Takve valne oblike prikazujemo udarnim naponom, Slika 2.15. Ti prenaponi mogu uzrokovati povratni preskok što dovodi do raspada izolatora, ispada vodova i zemljospoja [24] [26].



Slika 2.15. Oblik udarnog napona [25]

Što se tiče izbijanja između oblaka, nađeno je da se njihov frekventni spektar proteže od 3 kHz pa sve do nekoliko stotina MHz [27]. Tako i kod atmosferskog pražnjenja prema zemlji, pri početnom porastu javljaju se visoke frekvencije. Većina udara prema zemlji ima struju frekvencije ispod 10 MHz, dok je glavna amplituda na oko 400 do 500 kHz [28].



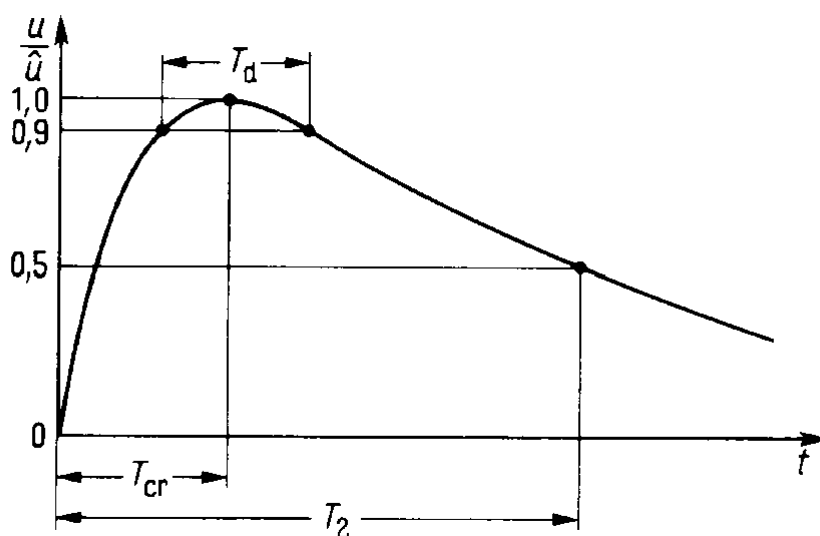
Slika 2.16. Frekvencijski spektar atmosferskog izbijanja prema zemlji [28]

Za razliku od ostalih uzročnika prijelaznih pojava, kod udara munje struja je veća te posjeduje više energije što uzrokuje ionizacije tla te nelinearan odziv [29].

Jedan od glavnih problema uzemljenja pri udaru groma je nejednolika raspodjela potencijala po sustavu uzemljenja što stvara sigurnosne probleme za ljude i opremu. Značajne promjene napona tla opasne su za ljude u okolini udara, a u tlu mogu poteći velike struje koje oštećuju opremu te stvaraju EM polje koje utječe na okolne osjetljive uređaje [26].

2.8.2. Sklopne radnje

Uklapanje ili isklapanje uređaja, gubitak tereta ili uklanjanje kvara u rasklopnim postrojenjima mogu izazvati prenapone. Kao i atmosferska pražnjenja, spadaju u prijelazne prenapone s razlikom polaganog porasta čela od $20 \mu\text{s}$ do $5000 \mu\text{s}$. Prikazuje se sklopnim udarnim naponom, vidljivom na slici ispod.



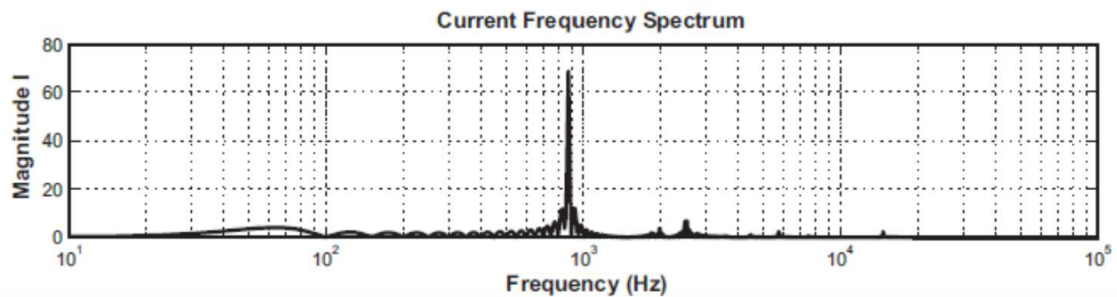
Slika 2.17. Sklopni udarni napon [25]

Visina sklopnih prenapona ovisi o konfiguraciji mreže i snazi kratkog spoja. Sklopni prenaponi kao što se ranije navelo nastaju iz nekoliko razloga, ali ne izazivaju sve pojavu visokih frekvencija. Uklapanje vodova nije visokofrekventni problem, nekoliko kilohertza, osim ako se uklapa preko kompleksnog izvora. Amplitude viših frekvencija prigušuju se već prije pojave amplituda nižih frekvencija. Zatim isklapanjem malih struja, bile kapacitivne ili induktivne, nastaje nestabilan strujni luk koji posjeduje visokofrekventnu oscilatornu struju. Također isklapanjem kvarova opasna je pojava povratnog napona koji može imati visoku frekvenciju i strminu.

2.8.3. Kratki spoj

Jedna od osnovnih vrsta kvarova u sustavu su poprečni kvarovi. Nastaju zbog proboja izolacije kao posljedica povećanja električnog naprezanja, smanjenja dielektrične čvrstoće izolacije ili kombinacije prethodna dvaju uzroka. S obzirom na broj obuhvaćenih faza kvarom, oni mogu biti trofazni, dvofazni, dvofazni sa zemljom te jednofazni.

Valni oblik struje kratkog spoja nije stacionaran, već sadrži mnoge harmonike osnovne frekvencije.



Slika 2.18. Tipični frekvencijski spektar struje kratkog spoja [30]

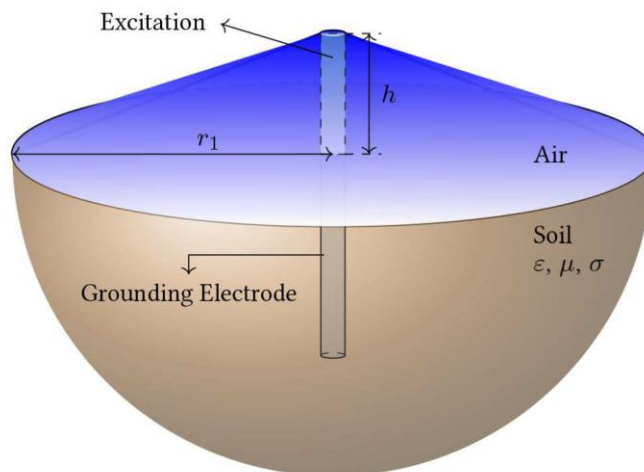
U radu [31] napravljena je frekvencijska analiza svih vrsta kratkog spoja na modelu prijenosnom vodu u Istočnoj Anatoliji s kratkotrajna Fourierova transformacija (engl. *Short time Fourier transformation*, STFT). Simuliran je kratki spoj u prvoj sekundi. Visokofrekventne komponente nastaju odmah nakon nastanka kratkog spoja. Njihov spektar se proteže od 50 do 3000 Hz.

3. Proračuni u različitim softverima

3.1. Opis modela

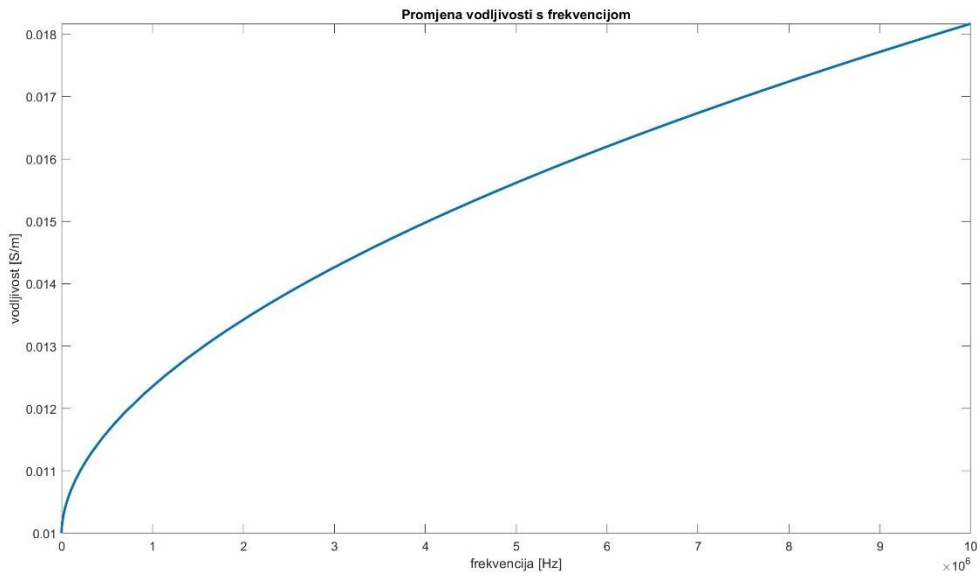
Proučavat će se jednostavan model štapnog uzemljivača od čelika duljine $l = 2 \text{ m}$, polumjera $r = 1 \text{ cm}$ te specifičnog otpora $\rho_u = 1.72 * 10^{-7} \Omega\text{m}$ ukopanog u zemlju specifičnog otpora $\rho_{z0} = 100 \Omega\text{m}$, $\mu_{z0} = 1 \text{ H/m}$, $\epsilon_{z0} = 10 \text{ F/m}$ s početkom na površini zemlje, dubina $h = 0 \text{ m}$. Tlo je modelirano kao polusferno područje radijusa $x = 10 \text{ m}$ oko uzemljivača čime se želi postići efekt beskonačno dalekog tla nultog potencijala.

Za analizu u stacionarnom stanju, u Maxwell-u i ANSYS-u, kroz uzemljivač za pobudu puštena je struja $I = 100 \text{ A}$. U HFSS analizi, model je rađen na predlošku iz rada [8]. Promatran je frekvencijski spektar od 1 kHz do 10 MHz.

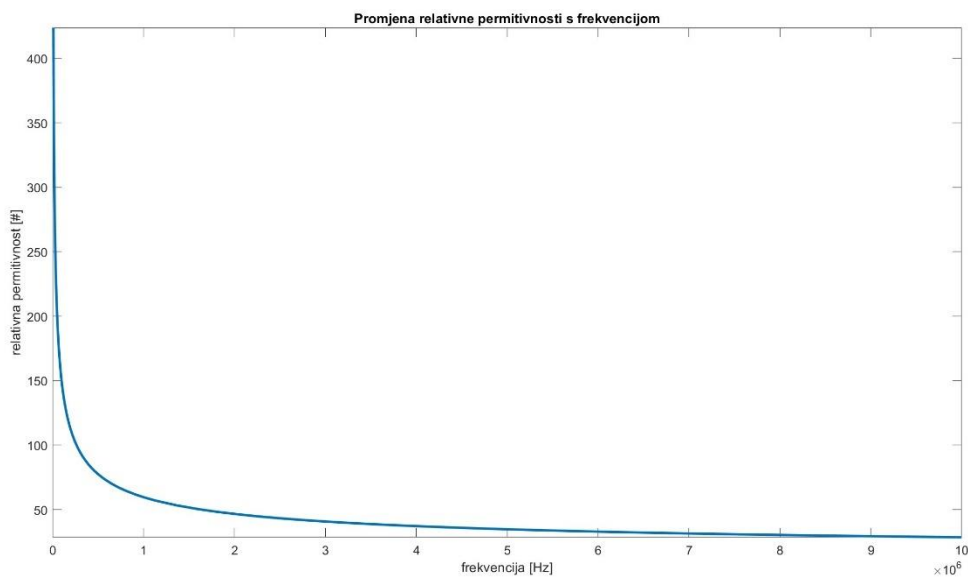


Slika 3.1. Pokazni model iz [8] prema kojem je rađen model u ovom radu

Za predstavljanje frekventne ovisnosti parametara materijala tla, specifični otpor i permitivnost postavljeni su s vrijednostima iz preporučenih CIGRE jednadžbi (2.10) i (2.11). Promjena je prikazana idućim grafovima.



Slika 3.2. Promjena vodljivosti s frekvencijom prema predloženoj funkciji za ovakva razmatranja



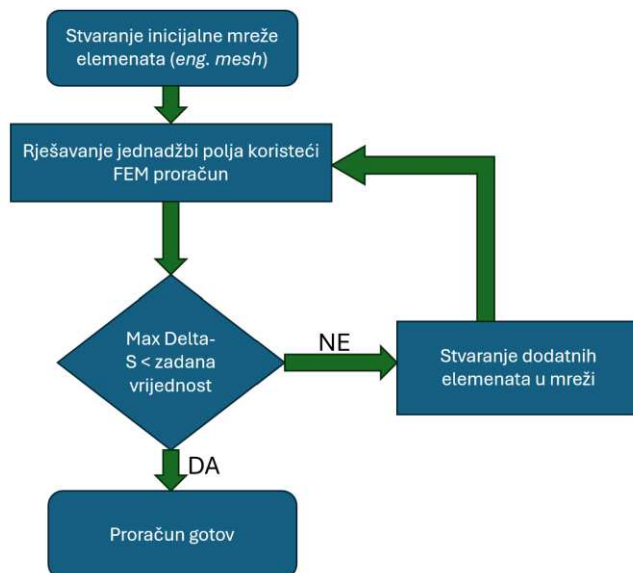
Slika 3.3. Promjena relativne permitivnosti s frekvencijom prema predloženoj funkciji za ovakva razmatranja

Napravljen je i dodatni model koji sadrži dvoslojno tlo. Model je u suštini isti samo što je tlo podijeljeno u dva dijela. Gornji tanji i vodljiviji sloj debljine 1 metra s parametrima tla 0.01 S/m te donji sloj s parametrima tla 0.005 S/m dok se permitivnost mijenja kao faktor usporedbe.

3.2. HFSS [32]

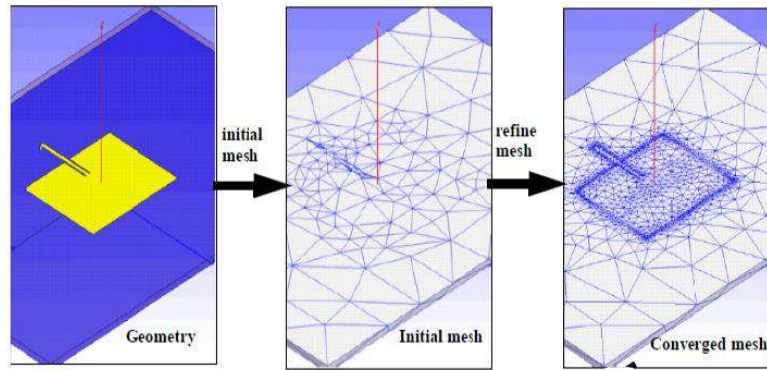
Ovaj ANSYS-ov softver napravljen krajem 1980.-ih koristi se za analizu elektromagnetskih ponašanja komponenti sustava. Koristi se kod brzih, visokofrekventnih tehnologija radarskih i komunikacijskih sustava, satelita, mikročipova, strujnih krugova. Akronim HFSS dolazi od punog naziva na engleskom jeziku *High Frequency Structure Simulator*.

Softver koristi napredni 3D elektromagnetski solver temeljen na adaptivnoj FEM numeričkoj metodi. Model se dijeli na mnogo manjih dijelova, elemenata, koji čine mrežu, mesh. Svaki od tih elemenata je oblika tetraedra te se u njima provode iterativni proračuni Maxwellovih jednadžbi, uz ograničenja rubnih uvjeta. Iteracije se razlikuju u mreži koja se po određenom principu mijenja, uglađuje, samo na mjestima gdje je greška S-parametra veća od inicijalno definirane. Takav način se naziva adaptivni iterativni način rješavanja.



Slika 3.4. Pojednostavljeni dijagram toka adaptivne metode

Takav adaptivni način ključan je u pronalaženju konačnog rješenja i takoreći karakteristika po kojoj se ovaj softver razlikuje od ostalih u ovom polju. Umjesto da korisnik sam mora trošiti mnogo vremena na detaljno namještanje mesh-a, program to radi za njega. Nakon inicijaliziranja početnog mesh-a, koji se temelji samo na geometriji modela ne uzimajući zadana električna svojstva, provodi se EM proračun. Iz dobivenih rezultata program određuje u kojem području je nastala veća pogreška te mijenja mesh stvaranjem dodatnih elemenata manjeg volumena te ponovno provodi EM proračun. Na Slika 3.5 može se vidjeti takva promjena mesh-a.



Slika 3.5. Usavršavanje mesh-a [32]

Proces usavršavanja ponavlja se dok proračun ne konvergira do konačnog, točnog, rješenja. Kada će sustav konvergirati ovisi o postavljenom uvjetu proračuna u Solution setup. Korisnik odabire uvjet u izborniku na Slika 3.6. Na izbor ima tri opcije: maksimalan broj koraka iteracije, maksimalni Delta-S te matrica konvergencije. Najkorišteniji i inicijalno postavljeni je Delta-S uvjet. Delta-S predstavlja razliku vrijednosti S-parametara dviju uzastopne iteracije te se provjerava je li ta vrijednost manja od specificirane, za koju priručnik preporuča da bude između 0.005 i 0.1. Fizikalno to znači da se EM energija više ne mijenja. Ako se koristi opcija broja koraka, program će dobiveno rješenje, recimo električnog polja koristiti u proračunu greške pomoću iduće jednačbe:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E}_{pokusaj} \right) - k_0^2 \epsilon_r \mathbf{E}_{pokusaj} = 0 \quad (3.1)$$

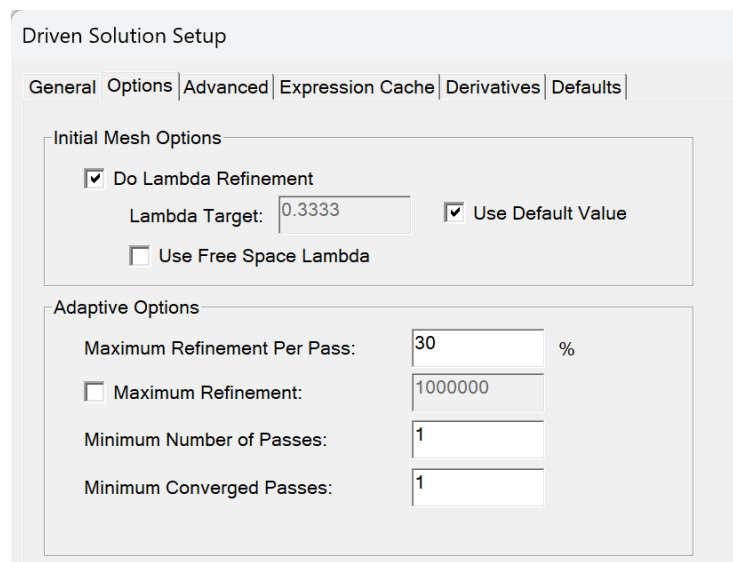
, gdje je:

$\mathbf{E}_{pokusaj}$ – rješenje električnog polja u elementu u trenutnoj iteraciji.

Simulacija će stati ako u zadanom broju koraka sustav ne izkonvergira te se mora povećati broj koraka. Dodatno se može uključiti, što se i preporuča, lambda uglađivanje čime se postiže da svi elementi mesh-a u zraku budu veličine četvrtine, a oni u dielektrika trećine valne duljine koja je temeljena na frekvenciji proračuna. Pomoću *refinement percentage* zadaje se najveći broj elementa, u postotku, koji mogu biti promijenjeni po koraku iteracije.

Maximum Number of Passes	<input type="text" value="20"/>
<input checked="" type="radio"/> Maximum Delta S	<input type="text" value="0.01"/>
<input type="radio"/> Use Matrix Convergence	<input type="button" value="Set Magnitude and Phase..."/>

Slika 3.6. Uvjeti konvergencije proračuna



Slika 3.7. Postavke lambda ugađivanja mesh-a

Napravljeni model u programu mora sadržavati električno i magnetsko polje jer se preko njih rješava problem, a ne preko napona i struja koji će se dobiti konstitutivnim relacijama koje daju odnose između EM veličina.

Govoreći o numeričkom rješavanju problema, za električno i magnetsko polje program koristi iduće jednačbe:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu_r} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_{0r}^2 \epsilon_r \mathbf{E} = -j\omega \mu_0 \vec{\mathbf{J}}_{source} \quad (3.2)$$

$$\mathbf{H} = \frac{j}{\omega \mu} \nabla \times \mathbf{E} \quad (3.3)$$

, gdje su:

\mathbf{E} – električno polje,

\mathbf{H} – magnetsko polje,

$\vec{\mathbf{J}}_{source}$ – bilo kakva pobuda,

$$k_0^2 = \frac{\omega^2}{c^2}.$$

U svakoj iteraciji za svaki element definira se testna funkcija W_n promjenjivog polinomnog reda koja je ustvari vektor koji zadržava tangencijalni kontinuitet eklektičnog polja. Zatim se te funkcije množe s jednačbom polja (3.2) i korištenjem Greenovog teorema i teorema o divergenciji dobiva

$$\int_V \left[(\nabla \times W_n) \cdot \left(\frac{1}{\mu_R} \nabla \times \mathbf{E} \right) - k_{0r}^2 \varepsilon_r W_n \cdot \mathbf{E} \right] dV = \int_S \text{rubni uvjeti} dS \quad (3.4)$$

Ako se za električno polje preformulira i napiše jednačina

$$\mathbf{E} = \sum_m x_m W_m \quad (3.5)$$

, tada se jednačina (3.4) raspiše kao

$$\sum x_m \int \left[(\nabla \times W_n) \cdot \left(\frac{1}{\mu_R} \nabla \times W_m \right) - k_0^2 W_n \cdot W_m \right] dV = \int_S \text{rubni uvjeti} dS \quad (3.6)$$

Što je ustvari oblika

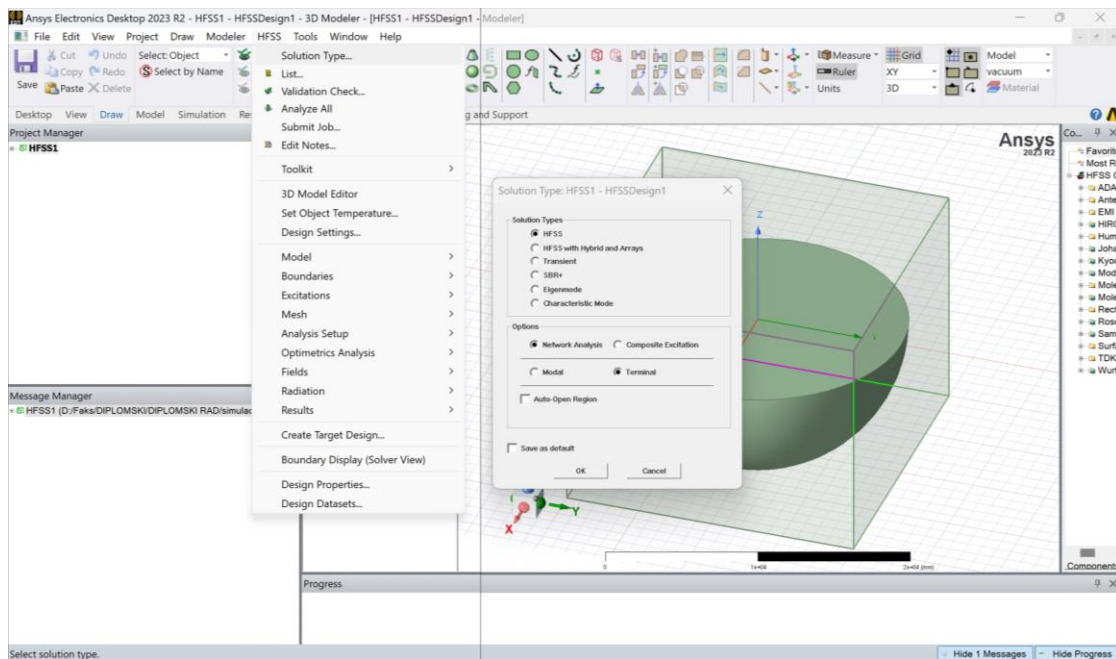
$$\sum x_m A_{n,m} = b_n, \quad n = 1, \dots, N \quad (3.7)$$

, odnosno

$$Ax = b \quad (3.8)$$

, gdje A predstavlja poznatu matricu dimenzija NxN koja sadrži sve postavljene rubne uvjete, dok b sadrži izvore pobuda. Rješavanjem jednačine (3.8) za x dobit će se rješenje električnog polja \mathbf{E} .

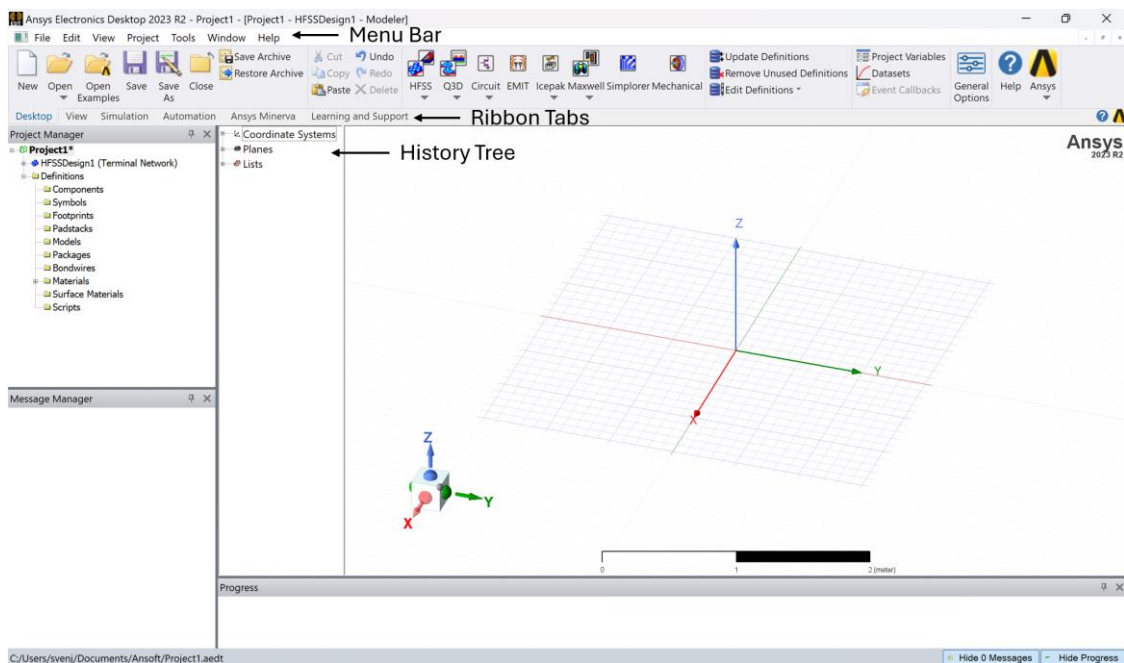
Prije ulaska u modeliranje modela navest će se još tipovi načina rješavanja. Mogući tipovi su običan HFSS, HFSS s hibridima i redovima, *Transient* za probleme u vremenskoj domeni koji je prikladan za impulsne odzive kao udar groma; SBR+ za proračune polja daleko od izvora; *Eigenmode* za određivanje rezonantnih frekvencija.



Slika 3.8. Odabir načina rješavanja

3.2.1. Modeliranje u HFSS

Ulaskom u HFSSDesign za 3D modeliranje otvara se prozor s koordinatnim sustavom u kojem se kreira model, Slika 3.9.

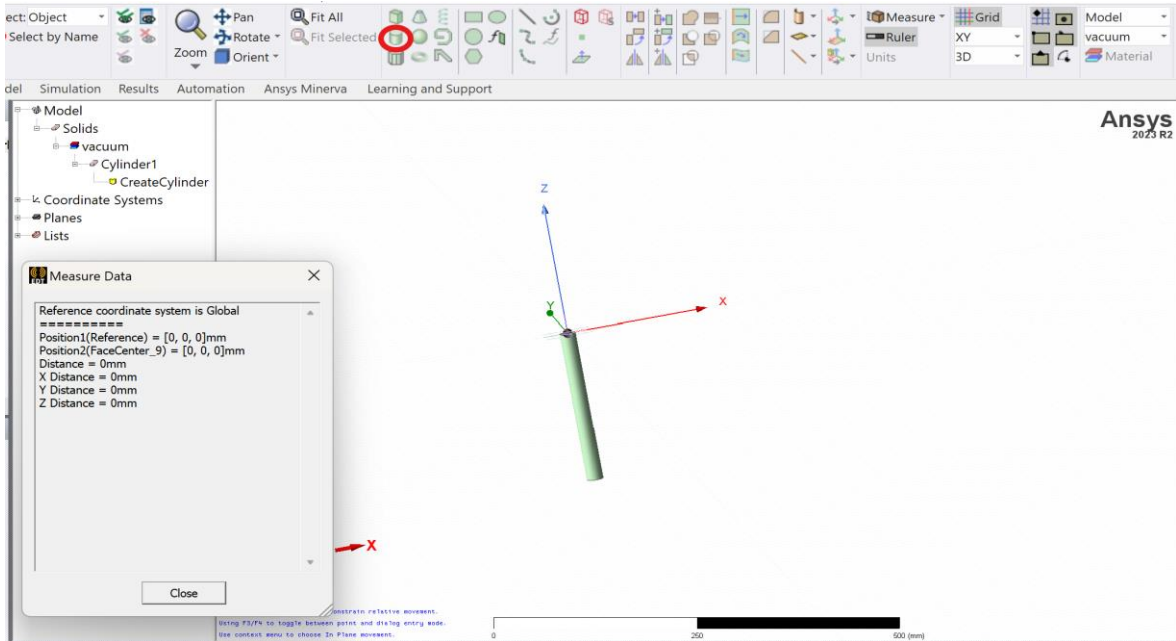


Slika 3.9. Početni izgled prozora za HFSS modeliranje

Po koordinatnom sustavu moguće se kretati pritiskom Shift na tipkovnici i pomicanjem miša uz pritisnut lijevi klik, a oko osi se okreće pritiskom Alt na tipkovnici uz iste radnje na mišu. Zumiranje, odnosno odzumiranje se radi ili kotačićem na mišu ili pritiskom zajedno Atl i

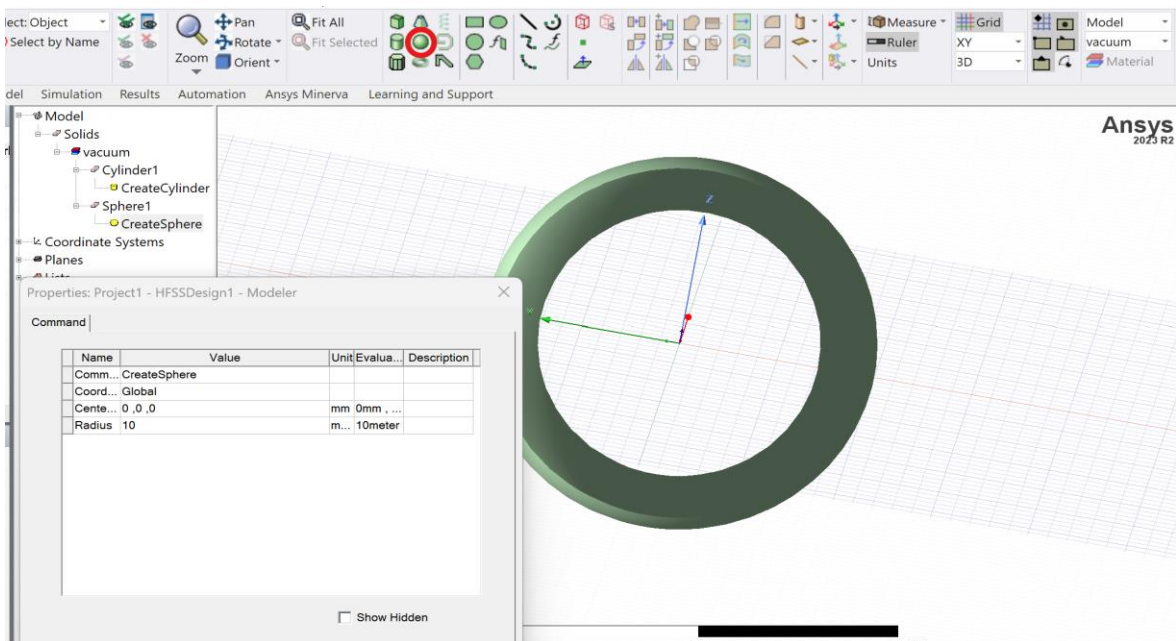
Shift te pomicanjem miša uz pritisnut lijevi klik. Ako se želi vratiti u pogled na cijeli model, nakon zumiranja, odzumiranja ili bilo kojeg drugog razloga, zajedničkim pritiskom Alt i Shift te duplim lijevim klikom na mišu to će se postići.

Prema opisu danom u poglavlju 3.1, crta se uzemljivačka šipka kao cilindar dimenzija radijusa 1 cm i duljine 2 metra, s centrom u (0,0,0) prema negativnom smjeru z-osi.

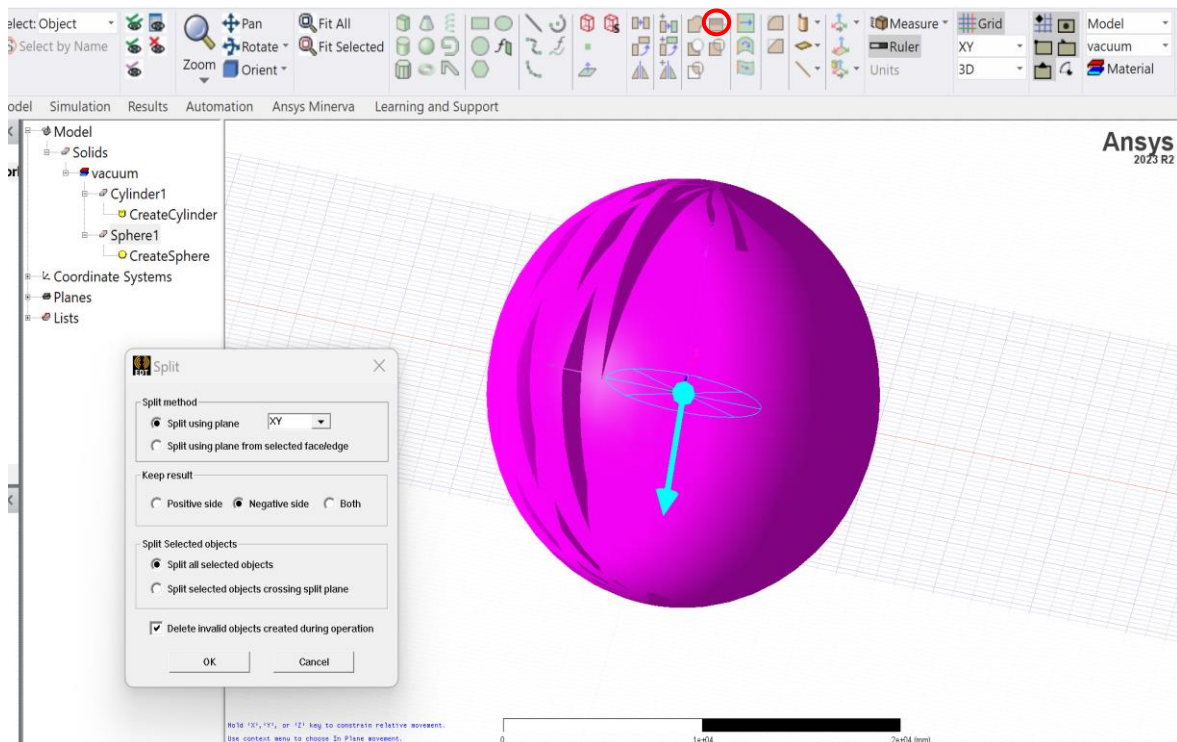


Slika 3.10. Crtanje cilindra za šipku

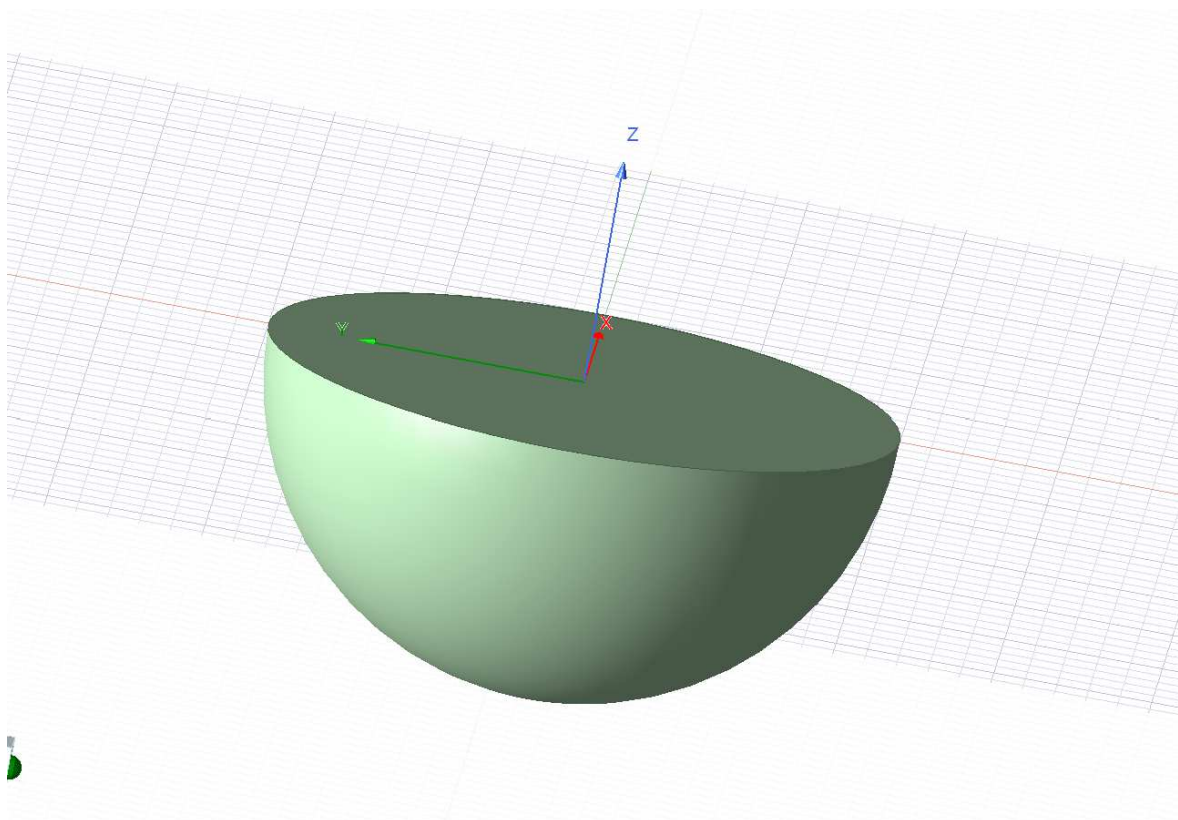
Za tlo crta se kuglu dimenzija 10 metara radijusa s centrom u (0,0,0), Slika 3.11, te ju se funkcijom *Split*, Slika 3.12, reže na pola tako da ostavimo samo donji dio, Slika 3.13.



Slika 3.11. Crtanje kugle za tlo

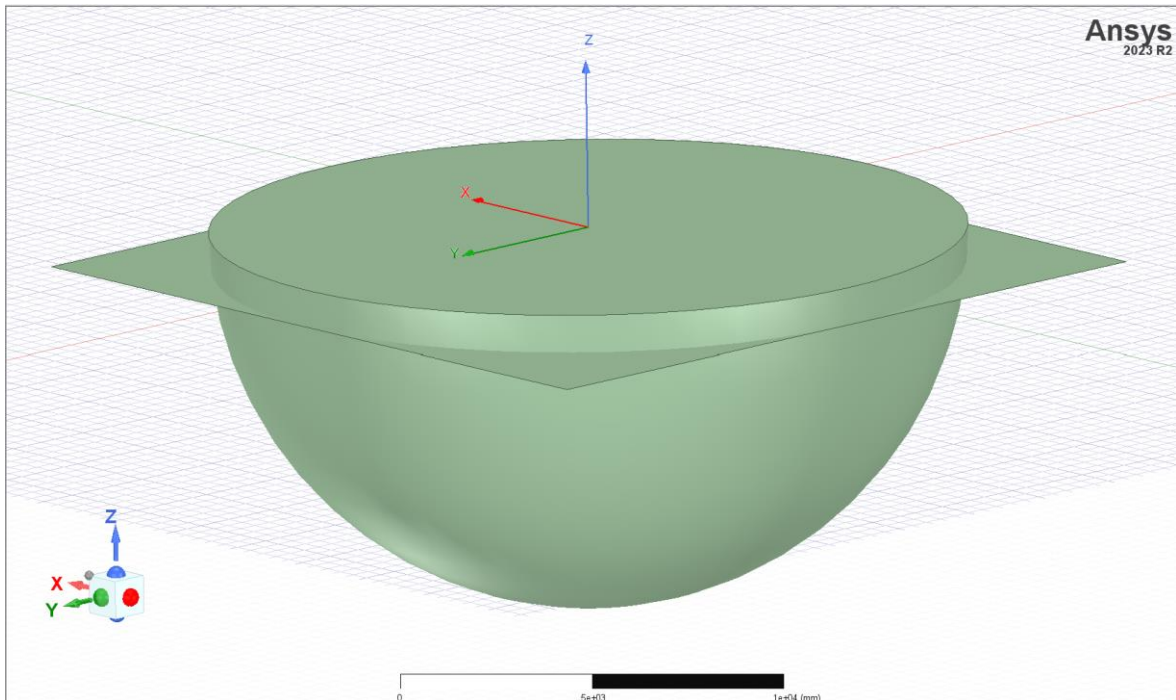


Slika 3.12. Korištenje naredbe Split za dobivanje polusfere

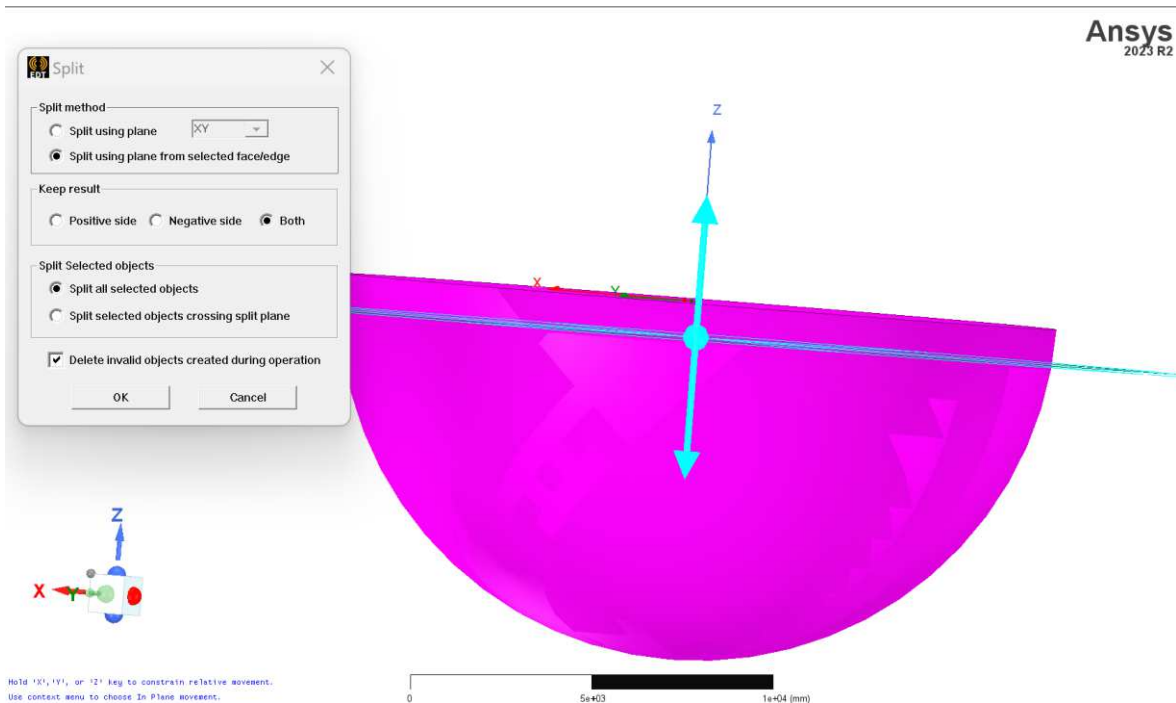


Slika 3.13. Konačni model polusfere tla

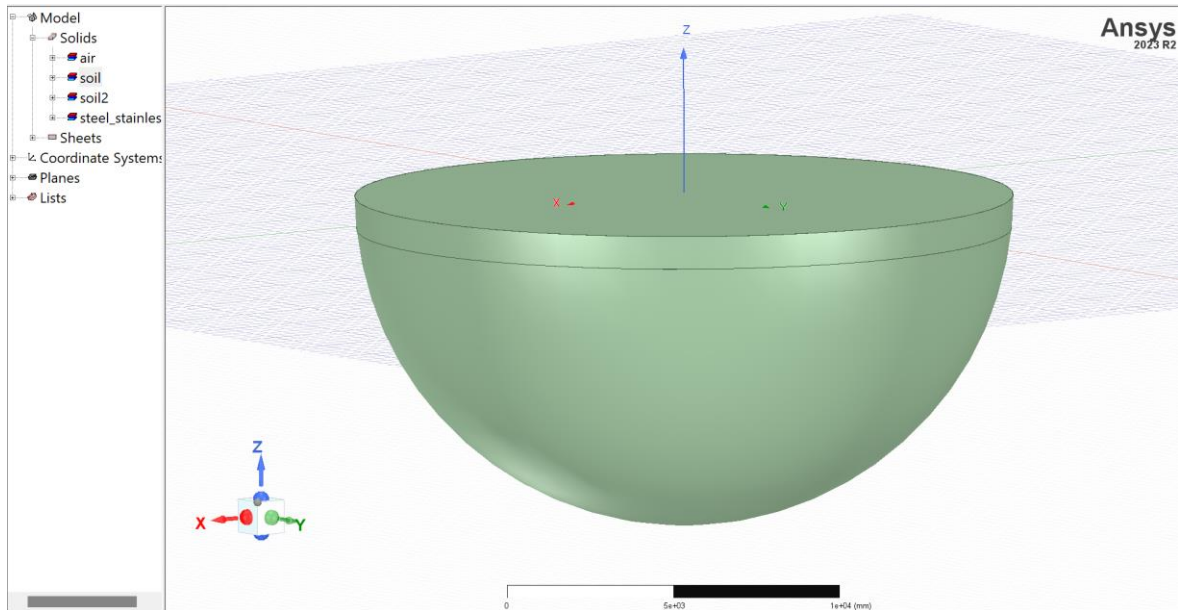
Za višeslojno tlo napravljen je pravokutnik u ravni $z=-1$ m i prema njemu je napravljen *Split* polusfere uz zadržavanje obaju dijelova, Slika 3.15.



Slika 3.14. Pravokutnik na visini $z=-1$ za ravninu podijele polusfere na slojeve

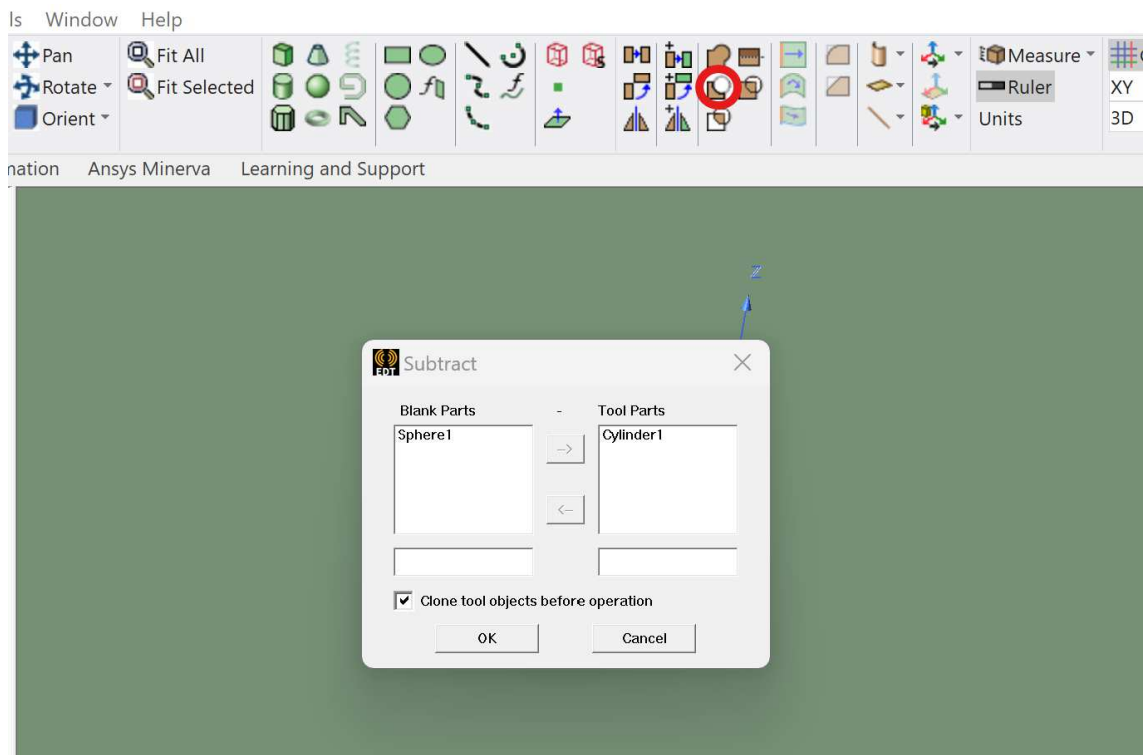


Slika 3.15. Korištenje naredbe *Split* za dobivanje dvoslojnog tla



Slika 3.16. Model tla za dvoslojno tlo

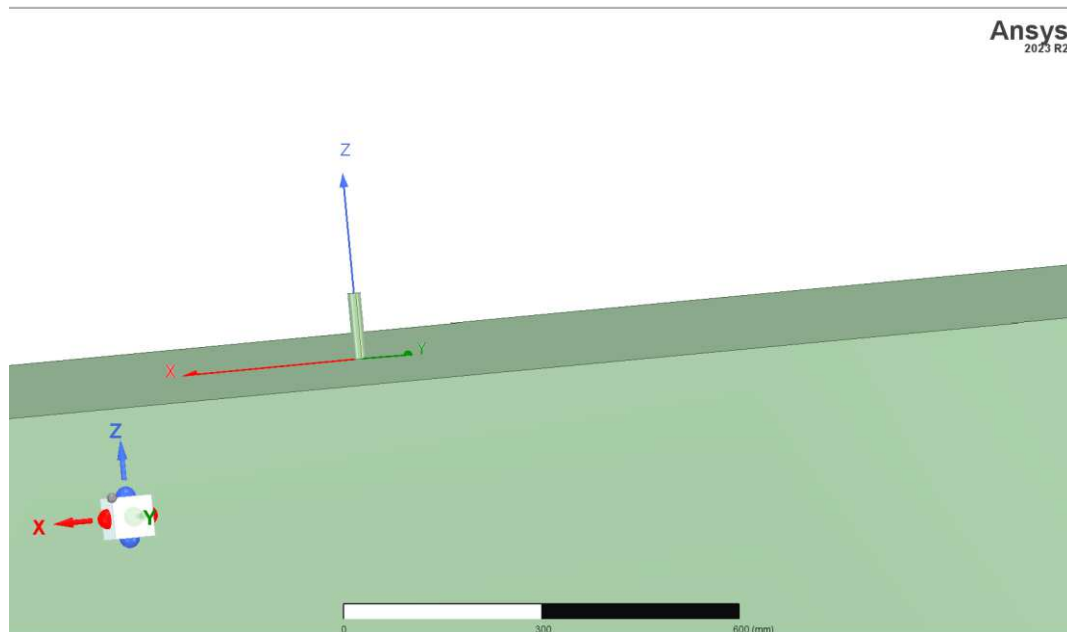
Trenutno tlo i šipka zauzimaju isti volumen pa je potrebno napraviti rupu u tlu gdje će biti šipka. To se radi funkcijom *Subtract*. Potrebno je obratiti pozornost koji element se oduzima od kojeg te da se za šipku (cilindar) napravi klon koji će i dalje ostati u modelu, Slika 3.17.



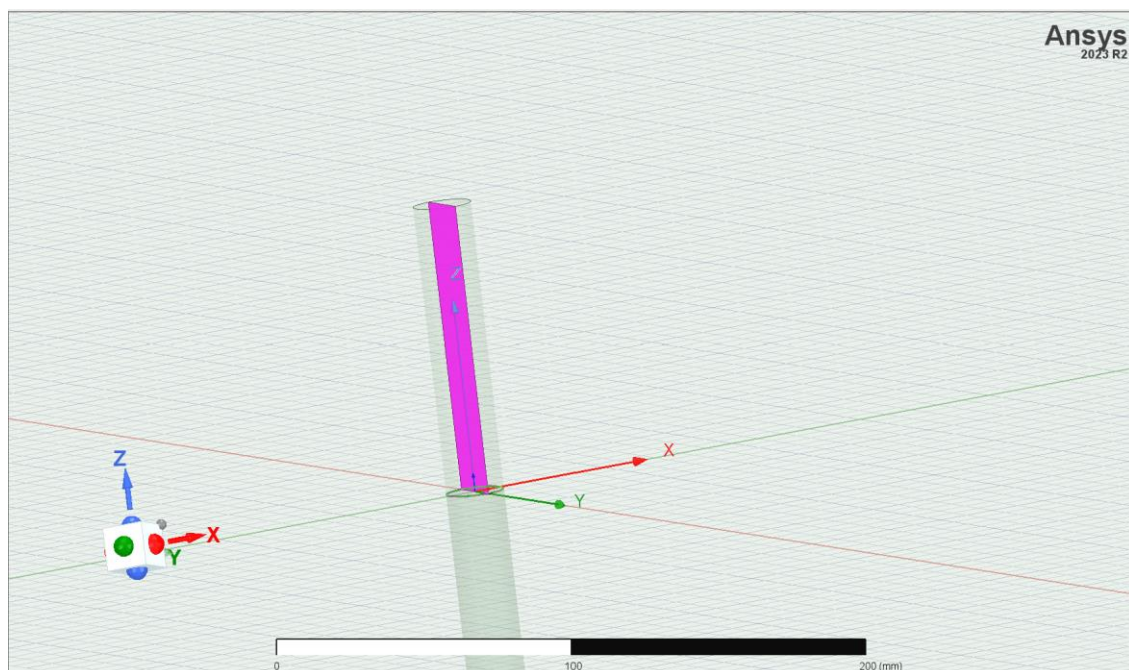
Slika 3.17. Korištenje naredbe *Subtract*

U nastavku uzemljivačke šipke izvan tla crta se cilindar jednakog polumjera u kojem će biti zadana pobuda. Visina izvora je deset centimetara. Pobuda se zadaje na ravninu, plohu, tako

da se kroz centar cilindra na x-os postavlja pravokutnik takvih dimenzija da u potpunosti prepolovi cilindar, Slika 3.19.

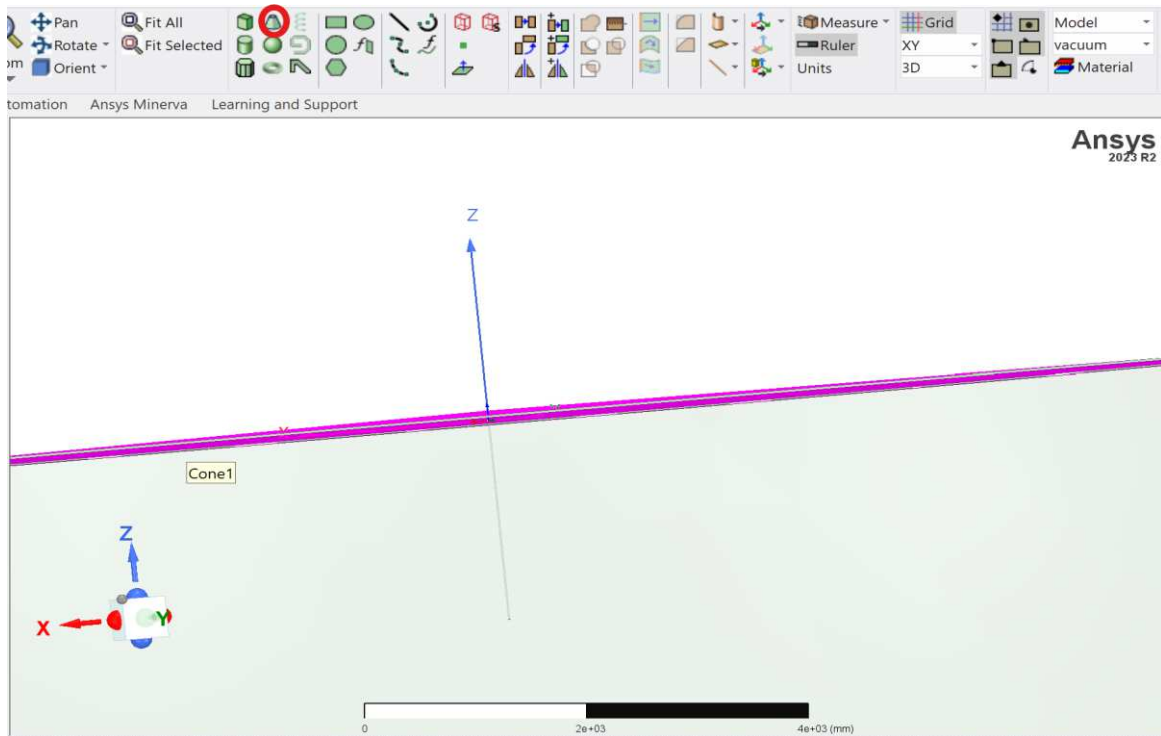


Slika 3.18. Cilindar za pobudu

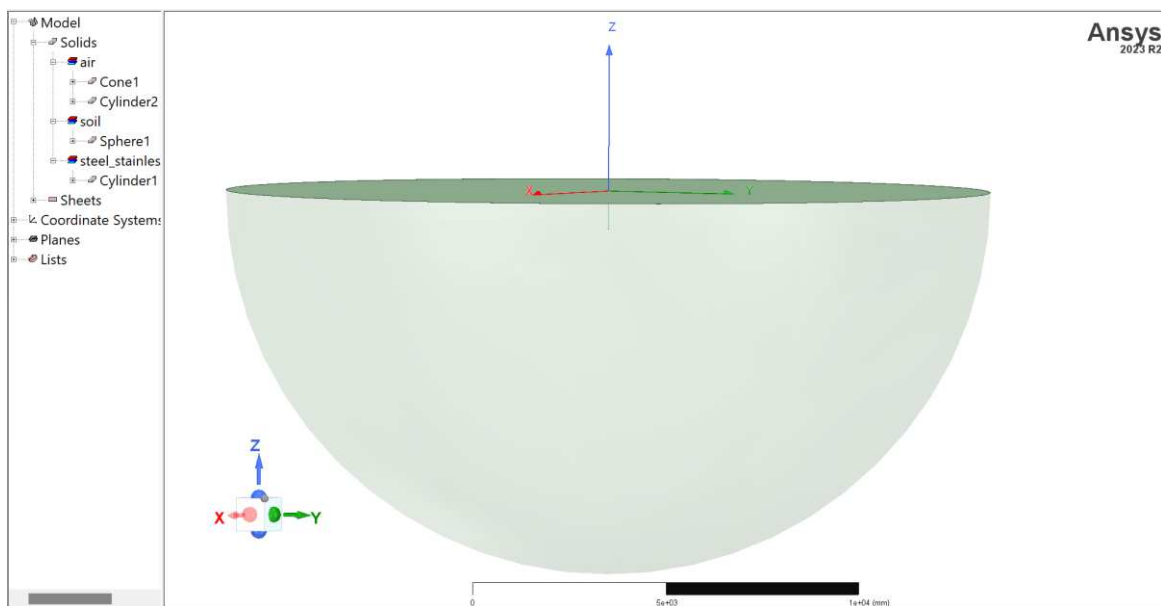


Slika 3.19. Pravokutnik unutar cilindra u kojem će biti pobuda

Pobuda se nalazi u zraku i sama je od materijala zraka. Okolni zrak prikazat će se stošcem koji prekriva cijelu gornju površinu polusfere te se uzdiže do visine cilindra pobude. Potrebno je cilindar pobude izuzeti iz volumena stošca kao što je rađeno s šipkom u tlu. Ovim je gotovo sa samim crtanjem.



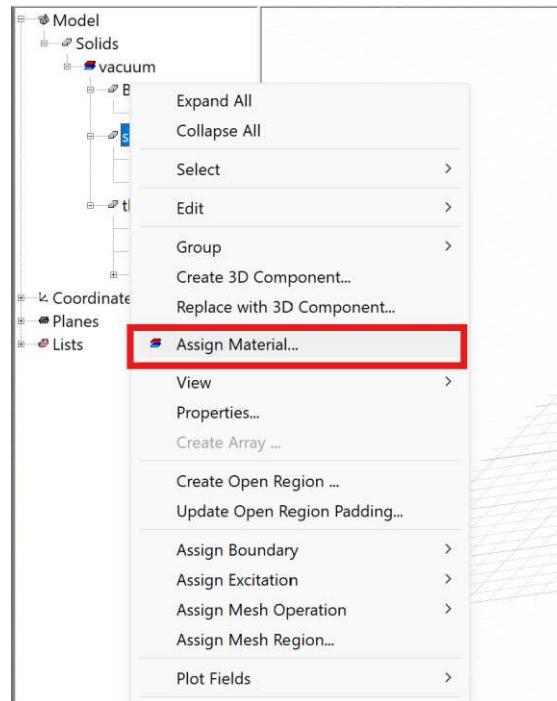
Slika 3.20. Stožac okoline za gornju granicu modela



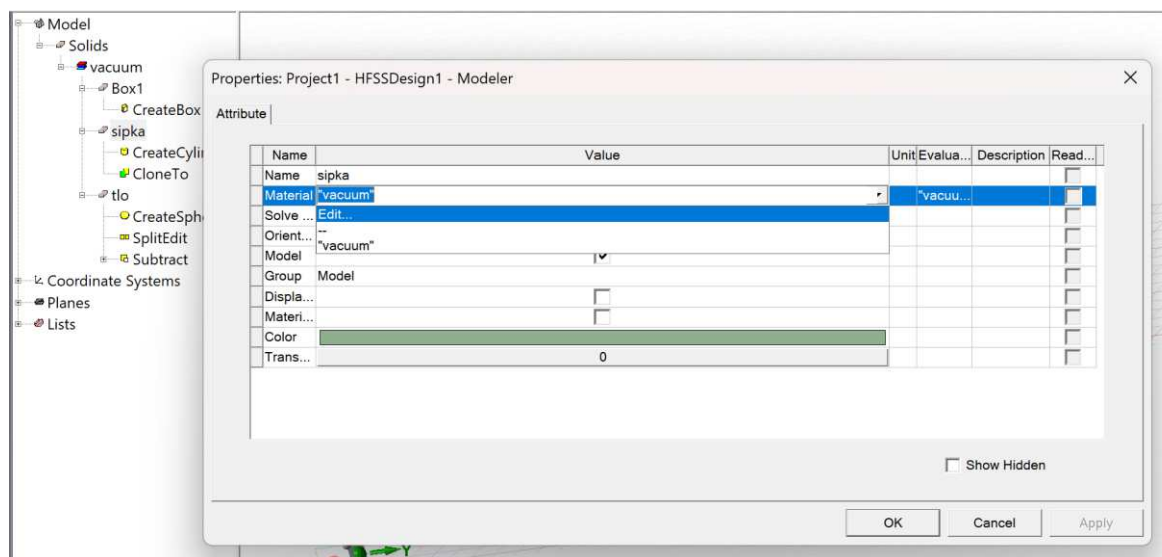
Slika 3.21. Konačni izgled modela uzemljivačkog sustava u programu HFSS

Sada se svim nacrtanim elementima pridjeljuje materijal. To je moguće napraviti na nekoliko načina. Jedan od njih je odabirom na objekt te u prozoru *Properties-Material*, Slika 3.22.(a). Slično odabirom na objekt i pritiskom desnog klika na mišu te *Assign Material...*, Slika 3.22.(b). Također duplim klikom na ime objekta u *command history* stablu otvorit će se *Attribute dialog box* u kojem je moguće zadati odnosno promijeniti materijal. Svakom materijalu moguće je pregledati postavljene parametre ti ih i promijeniti ili napraviti u

potpunosti novi materijal što će biti u slučaju s tlom. Tlo se modelira pritiskom na *Add Material* u prozoru na Slika 3.23 te se mu pridijeljeni parametre iz Tablica 3.1.

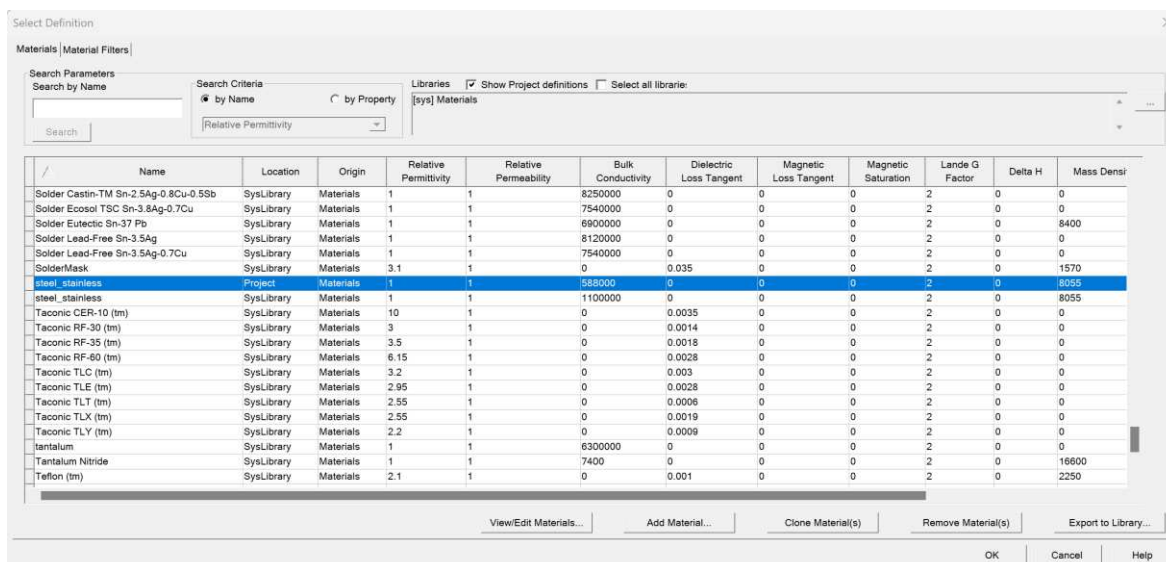


(a)



(b)

Slika 3.22. Mogući načini dolaska do prozora za zadavanje materijala objektima

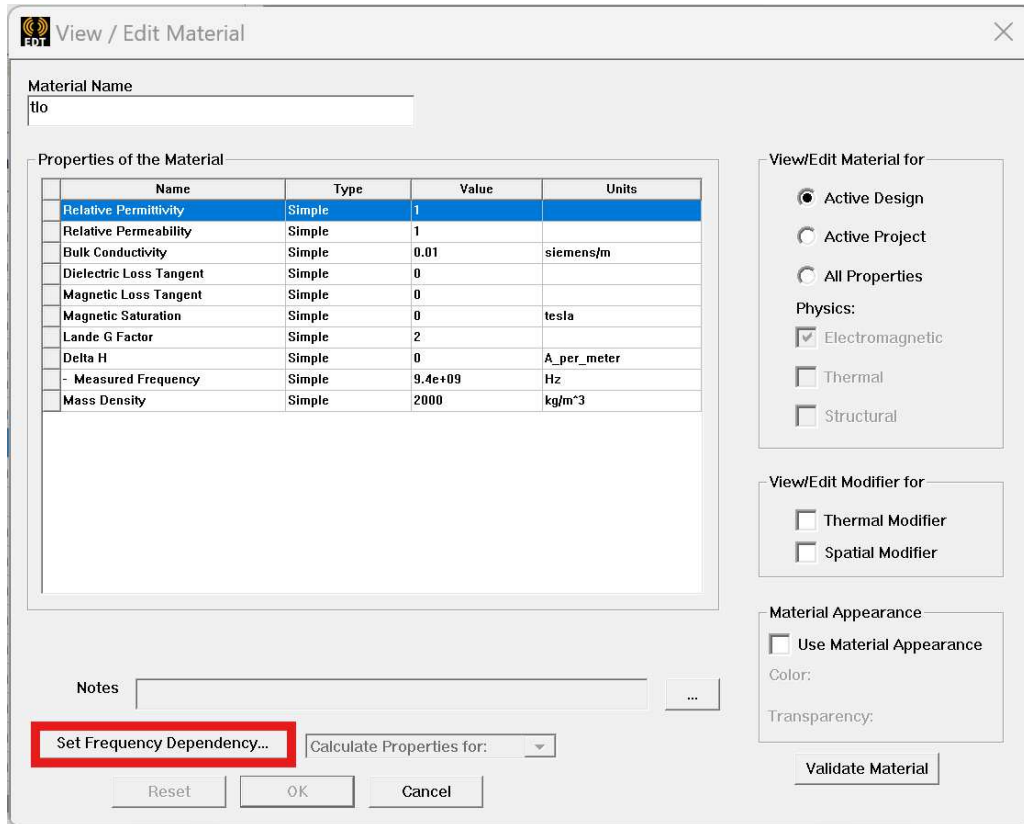


Slika 3.23. Prozor za odabir materijala

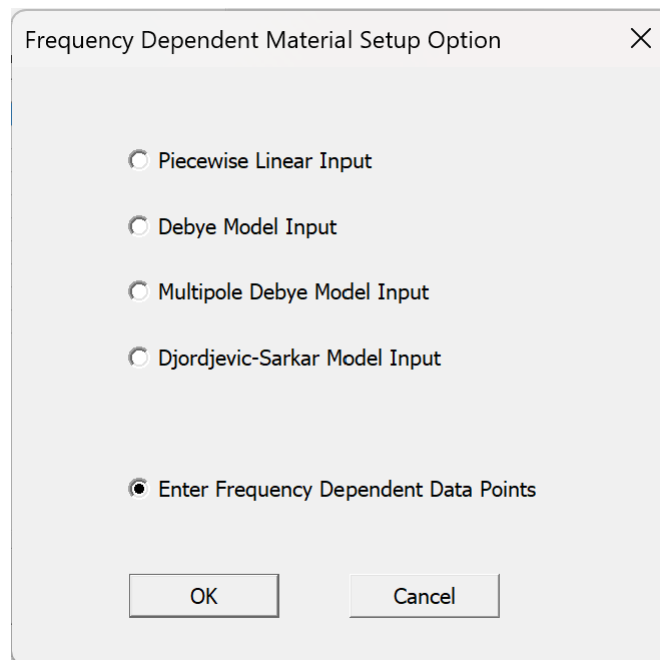
Moguće je zadati i frekventno ovisni materijal, no prethodno ga je potrebno stvoriti u bazi. Za stvaranje na dnu prozora materijala odabire se *Add Material* te u idućem prozoru u donjem lijevom kutu *Set Frequency Dependency...*, Slika 3.24. Frekventno ovisni materijal može biti zadan temeljem četiri različite definicije. Za *Piecewise linear model* definiraju se tri područja kretanja parametra, prvo u kojem je svojstvo konstantno, drugo u kojem ima linearnu promjenu te treće u kojem je ponovno konstantno. U *Frequency-Dependent Data Points* metodi definira se set točaka (frekvencija) za koje se definiraju vrijednosti svojstava. Navedene dvije metode primjenjuje se i za električna i magnetska svojstva, ali ne garantiraju da će materijal zadovoljiti uvjete kauzalnosti, a primjena im je samo u simulacijama u frekvencijskoj domeni. Iduća je *Debye* model koja se primjenjuje za dielektrike s gubitcima. Definiraju se dvije frekvencije te dielektrična konstanta i gubitke u dielektriku preko tangente gubitaka pri njima. Moguće je još definirati DC vodljivost i konstantnu relativnu permeabilnost. Posljednja opcija je *Djordjevic-Sarkar* model za koji je potrebno specificirati permitivnost i tangentu gubitaka samo na jednoj frekvenciji. Također dodatno se mogu unijeti vodljivost i permitivnost za DC. *Debye* i *Djordjevic-Sarkar models* metode primjenjuju se samo za električna svojstva te zadovoljavaju Kramer-Kroningove uvjete kauzalnosti. Imaju prioritet kod simulacija u vremenskoj domeni.

U ovom radu napravljene su simulacije i s konstantnim i s frekvencijski ovisnim parametrima materijala tla. Pri čemu je frekventna ovisnost zadana preko *Frequency-Dependent Data Points* metode za vodljivost i relativnu permitivnost, Slika 3.26. Točke

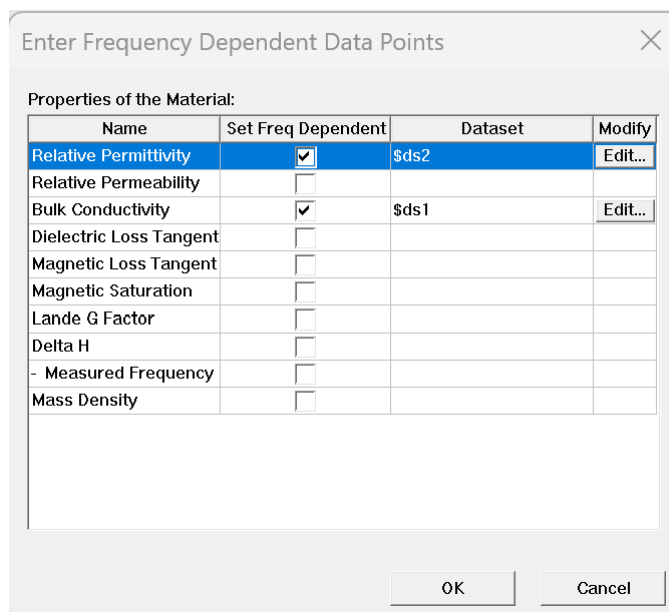
kretanja uzete su iz grafova na Slika 3.2 iSlika 3.3 koji predstavljaju preporučene CIGRE
jednadžbe (2.10) i (2.11) te su prikazane na Slika 3.27 iSlika 3.28.



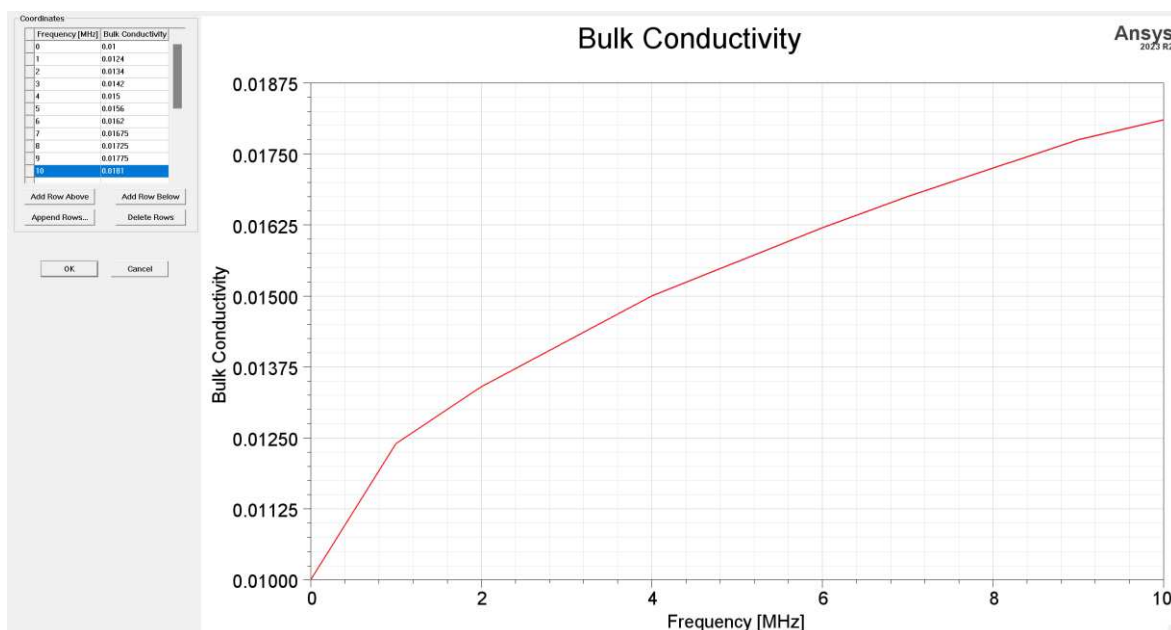
Slika 3.24. Kako doći do prozora zadavanja frekvencijske ovisnosti materijala



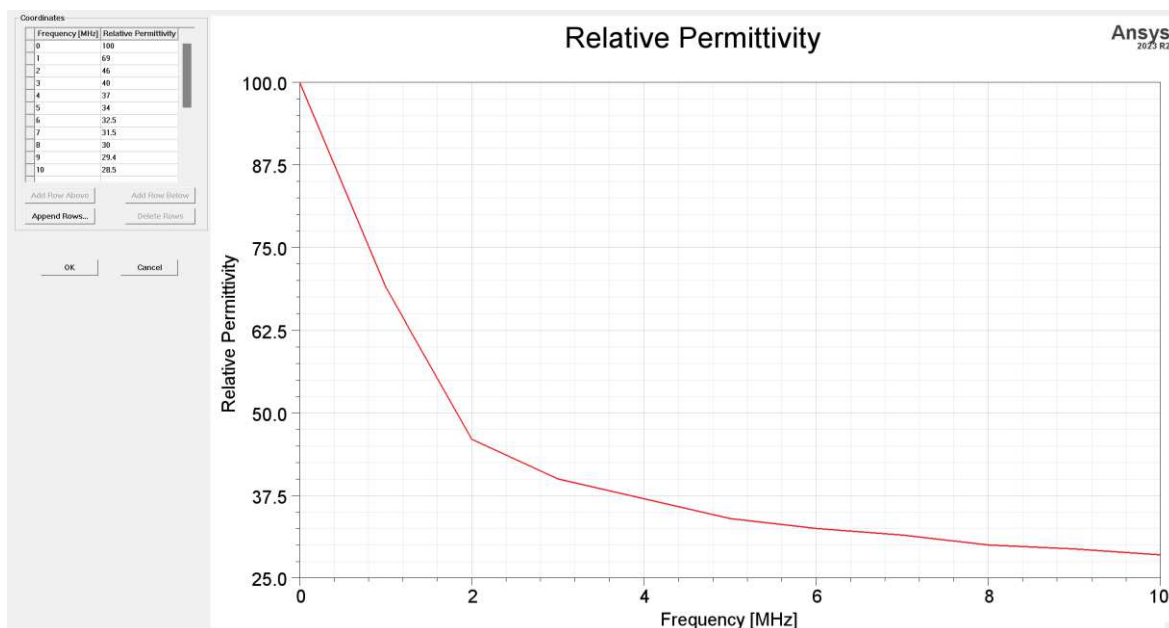
Slika 3.25. Mogući načini definiranja frekvencijske ovisnosti parametara materijala



Slika 3.26. Postavljanje frekvencijske ovisnosti svojstvima materijala preko podatkovnih točaka



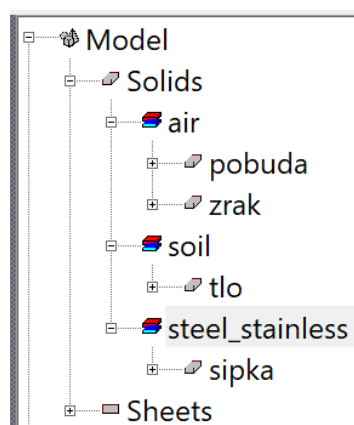
Slika 3.27. Frekventna ovisnost vodljivosti korištena u HFSS proračunu



Slika 3.28. Frekventna ovisnost relativne permitivnosti korištena u HFSS proračunu

Tablica 3.1. Tablica korištenih materijala s njihovim parametrima

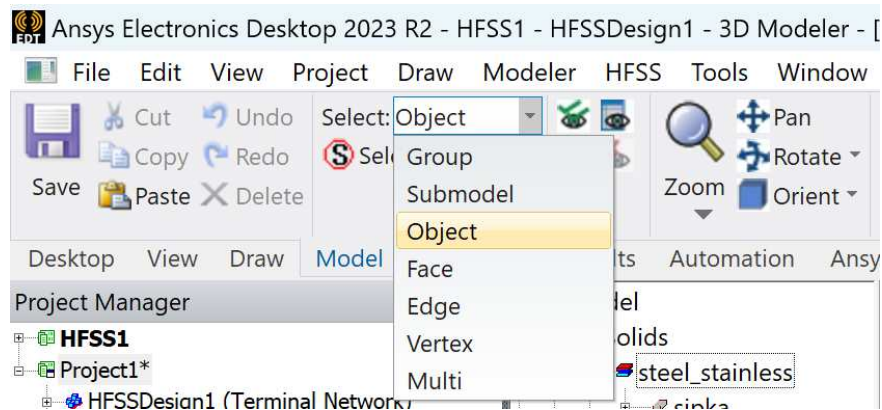
Svojstvo materijala	Čelična šipka	tlo	Zrak
Relativna permitivnost	1	3	1.0006
Relativna permeabilnost	1	1	1.0000004
Vodljivost [S/m]	588000	0.01	0
Gustoća [kg/m ³]	8055	2000	1.1614



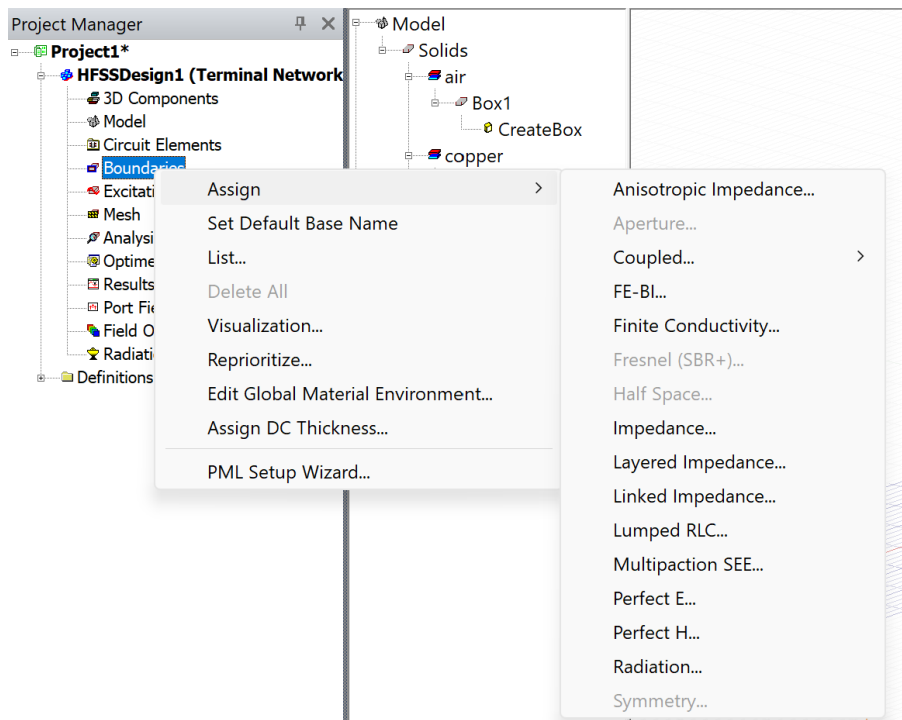
Slika 3.29. Pregled pridijeljenih materijala objektima

Iduće predstoje rubni uvjeti. Njihova svrha je definirati ponašanje EM polja na mjestima interakcije objekata te rubovima područja problema simulacije. Time se smanjuju EM i geometrijska kompleksnost modela. Ako nije zadano drugačije, HFSS promatra model kao zatvoreni sustav s rubnim uvjetom savršene električne vodljivosti na svim vanjskim površinama. Uvjeti se zadaju na stranicama 3D i površinama 2D objekata. Prema vrsti rubni uvjeti mogu biti vodljivosti, zračenja i PML, Slika 3.31. Uvjeti vodljivosti su u ovom radu od jedine važnosti. Oni se dodatno dijele na savršeni električni vodič (PEC), konačna vodljivost i impedantna granica. Perfect E, odnosno punim nazivom *Perfect Electric Conductor*, forsira električno polje da bude okomito na površinu, čime tangencijalna komponenta postaje jednaka nuli i val ostaje unutar promatranog područja.

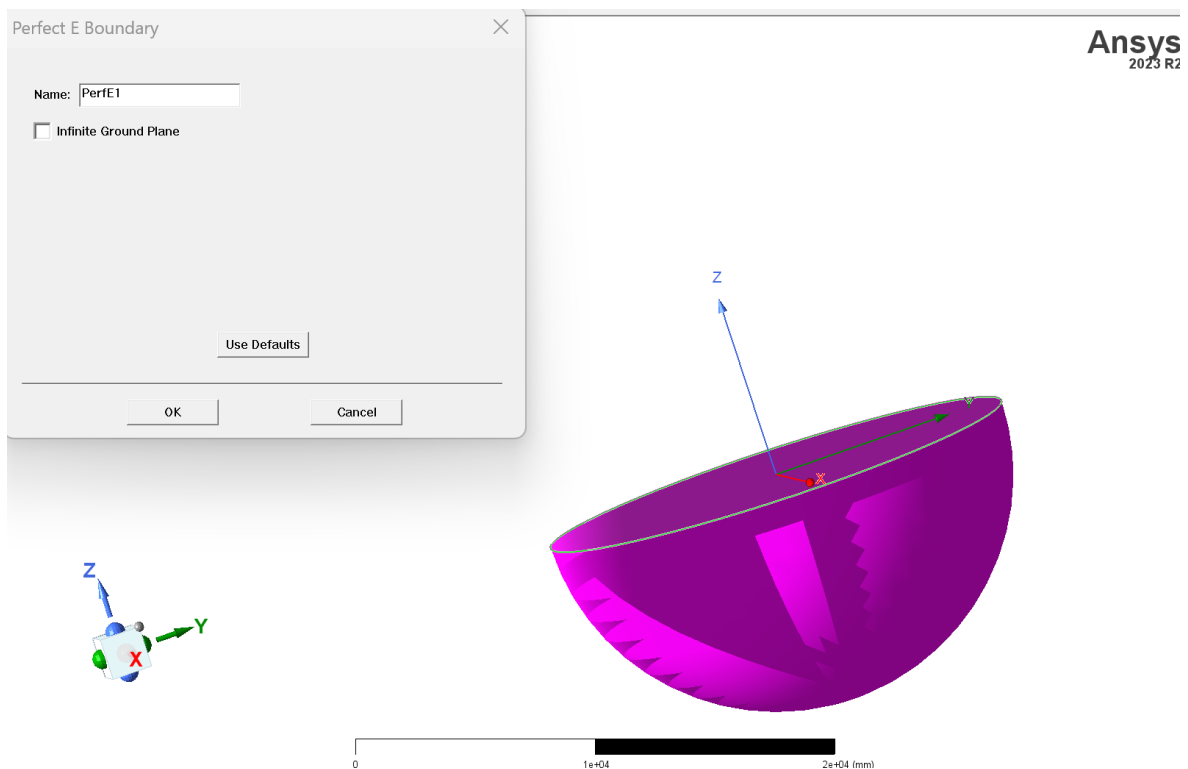
Obzirom da se rubni uvjeti zadaju na površinu, a ne objekt, potrebno je prijeći u mogućnost takvog odabira. To se radili ili pritiskom tipke F na tipkovnici ili u alatnoj traci u padajućem izborniku odabirom *Face*, Slika 3.30. Uvjet Perfect E dodajemo na plašt polusfere te plašt stošca zraka.



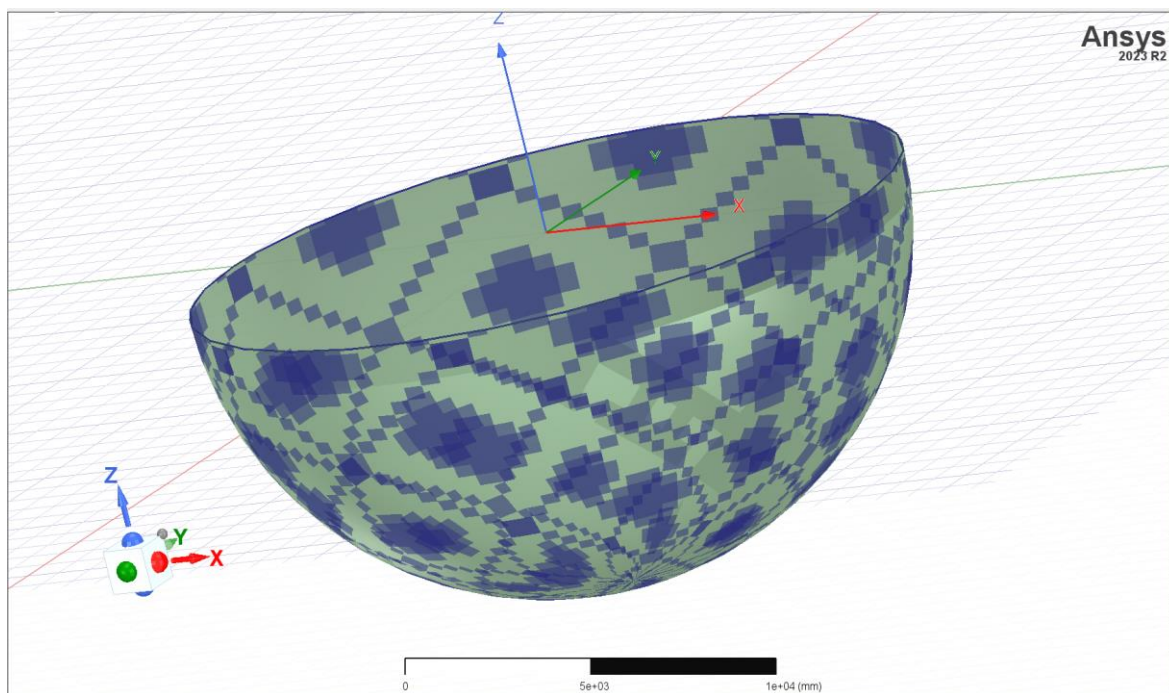
Slika 3.30. Prijelaz na odabir površina



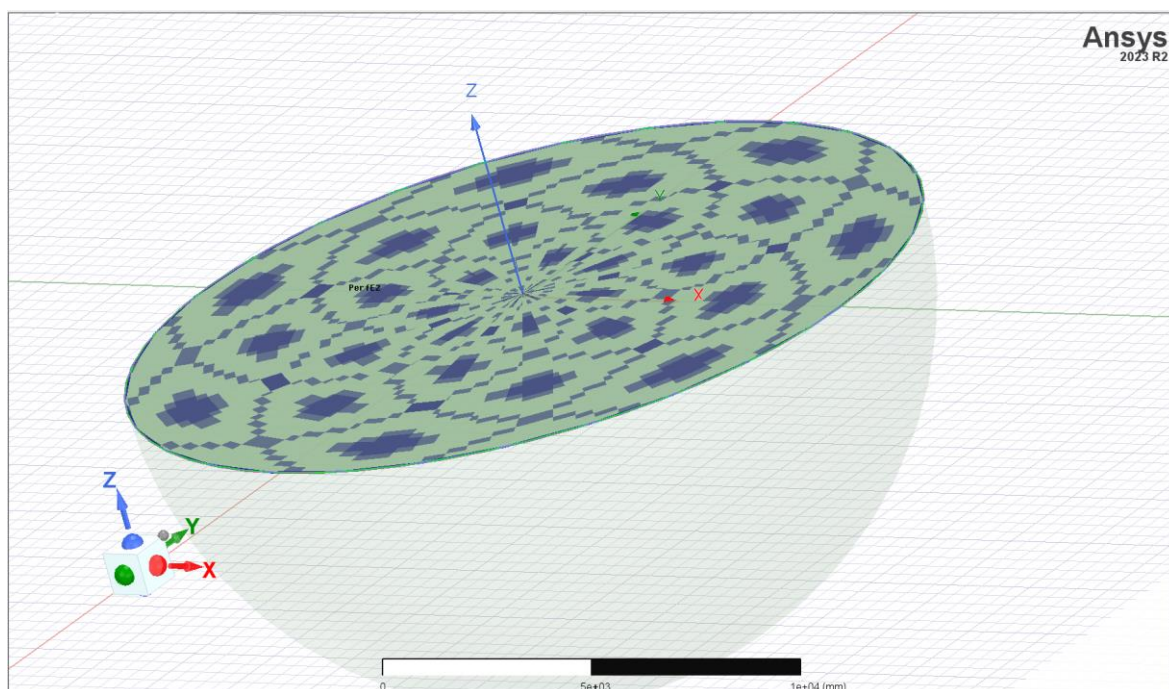
Slika 3.31. Zadavanje mogućih rubnih uvjeta



Slika 3.32. Zadavanje graničnog uvjeta savršene vodljivosti



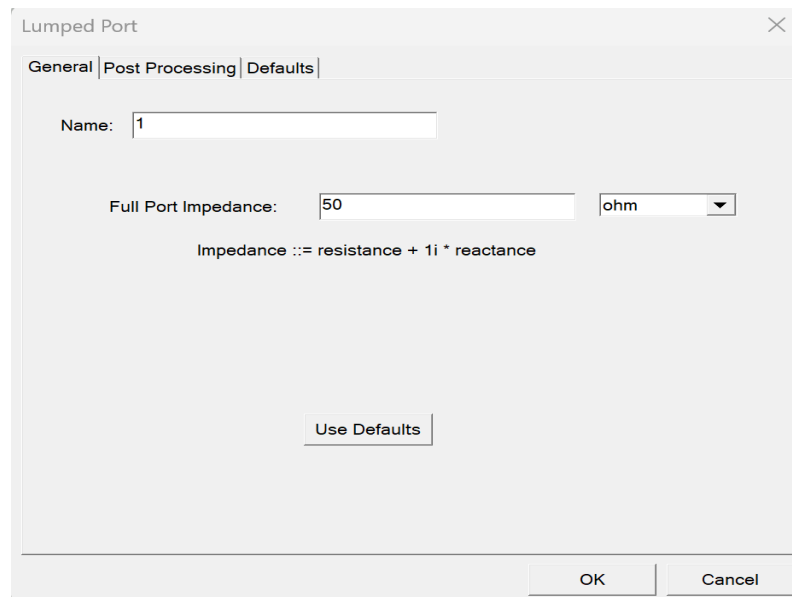
Slika 3.33. Granični uvjet Perfect E postavljen na beskonačno daleko tlo



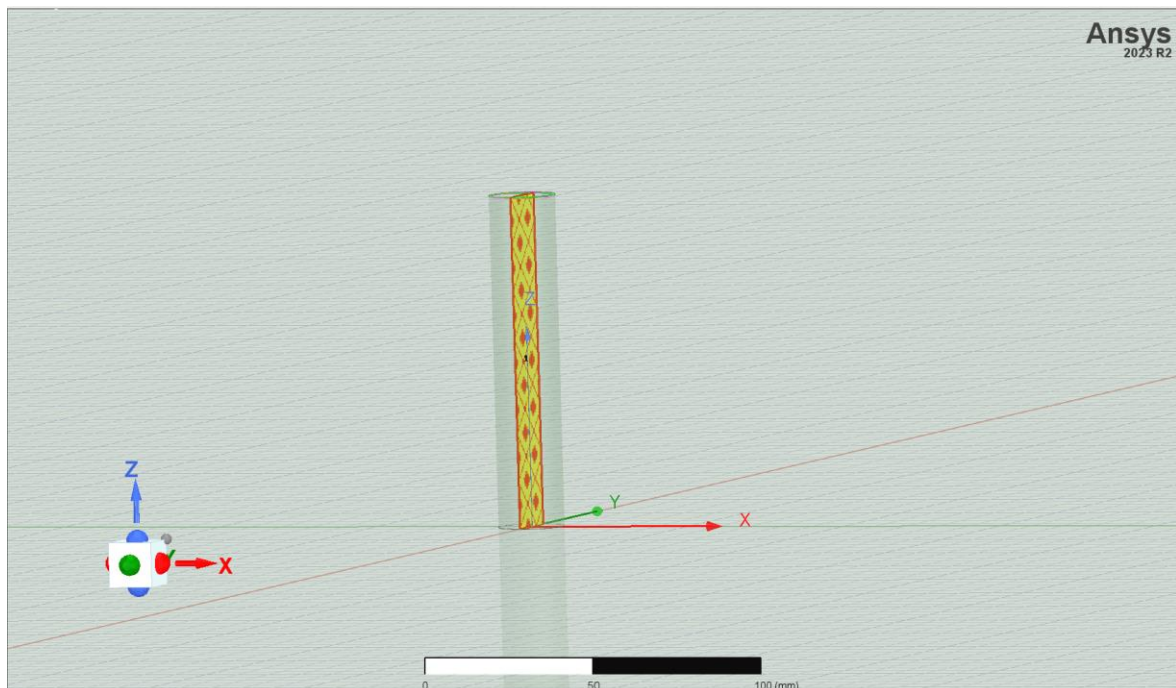
Slika 3.34. Granični uvjet Perfect E postavljen na okolni zrak

Slijedi zadavanje pobude. Pobuda je neki oblik izvora EM polja u model. Korisnik na izbor ima nekoliko vrsta: Wave Port, Lumped Port, Floquet Port, Terminal, Incident Wave, Linked Field, Current Source, Voltage Source i Magnetic Bias Source. Najčešće se koriste portovi. Oni daju S, Y i Z parametre te informacije o polju. U modelu se koristi Lumped port. Takav izvor analogan je strujnom u klasičnim proračunima. Postavlja se unutar volumena proračuna na dodiru dvaju vodljiva objekta. Svi rubovi modela koji ne dodiruju vodiče imaju

zadan rubni uvjet Perfect H, što stvara da je normalno električno polje na tim površinama jednako nuli. Prilikom zadavanja potrebno je postaviti kompleksnu impedanciju izvora koja će biti korištena kao referentna impedancija za S-matricu. Ona predstavlja jačinu izvora.



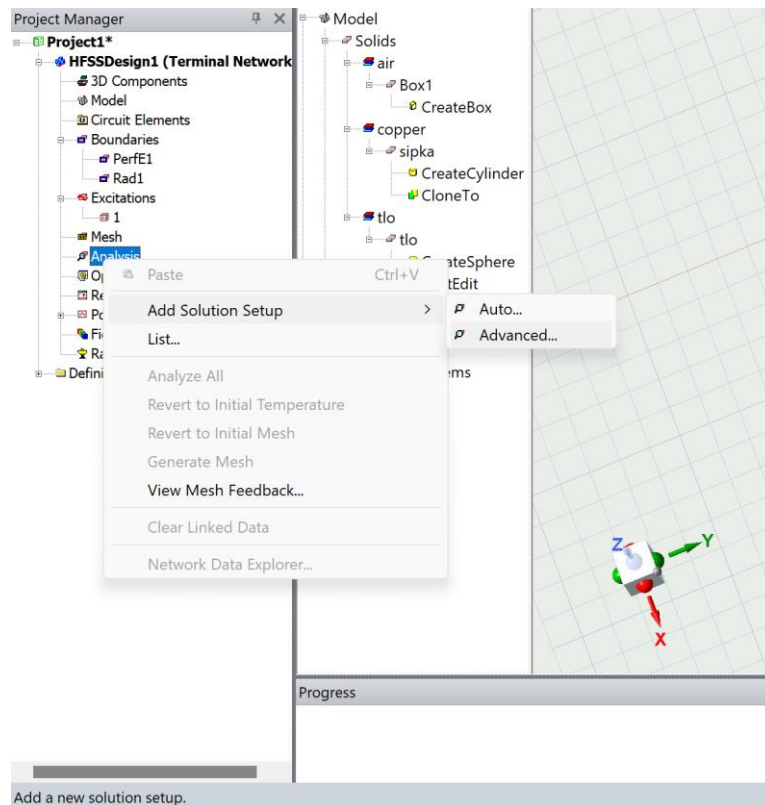
Slika 3.35. Zadavanje Lumped Port pobude



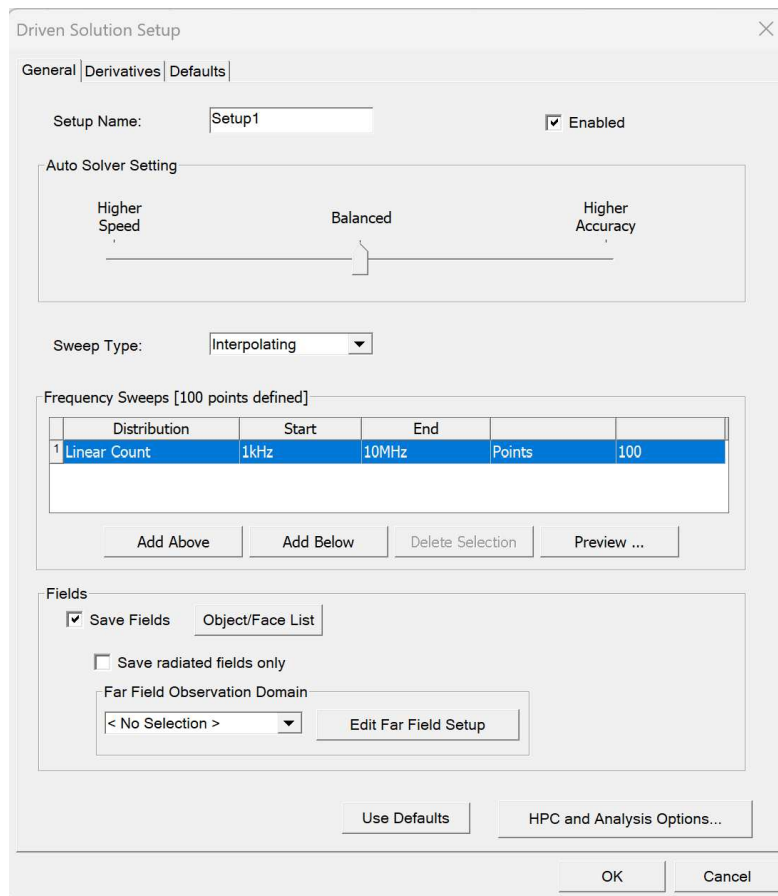
Slika 3.36. Prikaz pobude u modelu

Posljednji dio modeliranja je zadati postavke proračuna kao što su frekvencija proračuna, promatrano frekvencijsko područje i uvjet konvergencije. Navedeno se postavlja u prozoru *Driven Solution Setup* do kojeg se dolazi desnim klikom na *Analysis* u *Project Manager* prozoru te odabirom *Add Solution Setup*, Slika 3.37. Pod *Solution Frequency* definira se

frekvencija na kojoj će program napraviti proračun, a time je dodatno definirana maksimalna početna veličina elemenata mreže preko lambda opcije o čemu je ranije govoreno. Nakon ovog definiranja ako se radi simulacija na nekom frekvencijskom spektru potrebno je dodati *Frequency Sweep*. Desnim klikom miša na prethodno napravljeni setup pod *Add frequency sweep...* otvorit će se novi prozor, Slika 3.38, u kojem se definira vrsta frekvencijskog pregleda, početna i konačna frekvencija, veličina koraka ili broj koraka. Prema vrsti, korisnik ima na odabir tri mogućnosti ovisno o svrsi proračuna: diskretan, brz i interpolacija. Diskretan pregled se primjenjuje kada su potrebni proračuni samo na određenim frekvencijama. Brzina simulacije proporcionalna je broju zadanih frekvencija. Brzi pregled radi proračune u proizvoljnim točkama definiranog spektra radeći reducirani model reda temeljen na Eigenovim vrijednostima oko frekvencije proračuna pa ju je poželjno postaviti jednakom centralnoj frekvenciji spektra. Zatim se te vrijednosti koriste u adaptivnom Lanczos-Pade pregledu koji određuje polje u svim frekvencijama spektra. Pogodno je za probleme s rezonancijama jer daje poprilično točne rezultate polja oko rezonantnih frekvencija. Interpolacijski pregled ima najbolju primjenu kod simulacija s DC i VF razmatranjima, no ne daje rezultate o polju dok ih diskretni i brzi pregled daju. Računa S-matricu u zadanom frekvencijskom području tako da program bira prikladne frekvencije za koje će raditi proračune polja. Odabir prikladnih frekvencija radi se dok rješenje ne konvergira. I za brzi pregled i interpolaciju veličina frekvencijskog spektra ne određuje vrijeme potrebno za proračun jer se većina vremena potroši na generiranje prijenosne funkcije. Kada se ona izgenerira, proračun se brzo izvršava.

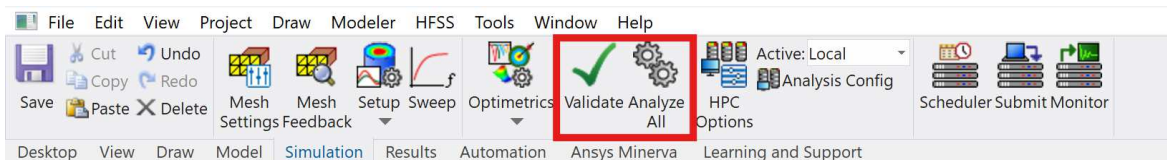


Slika 3.37. Dolazak do zadavanja postavki analize



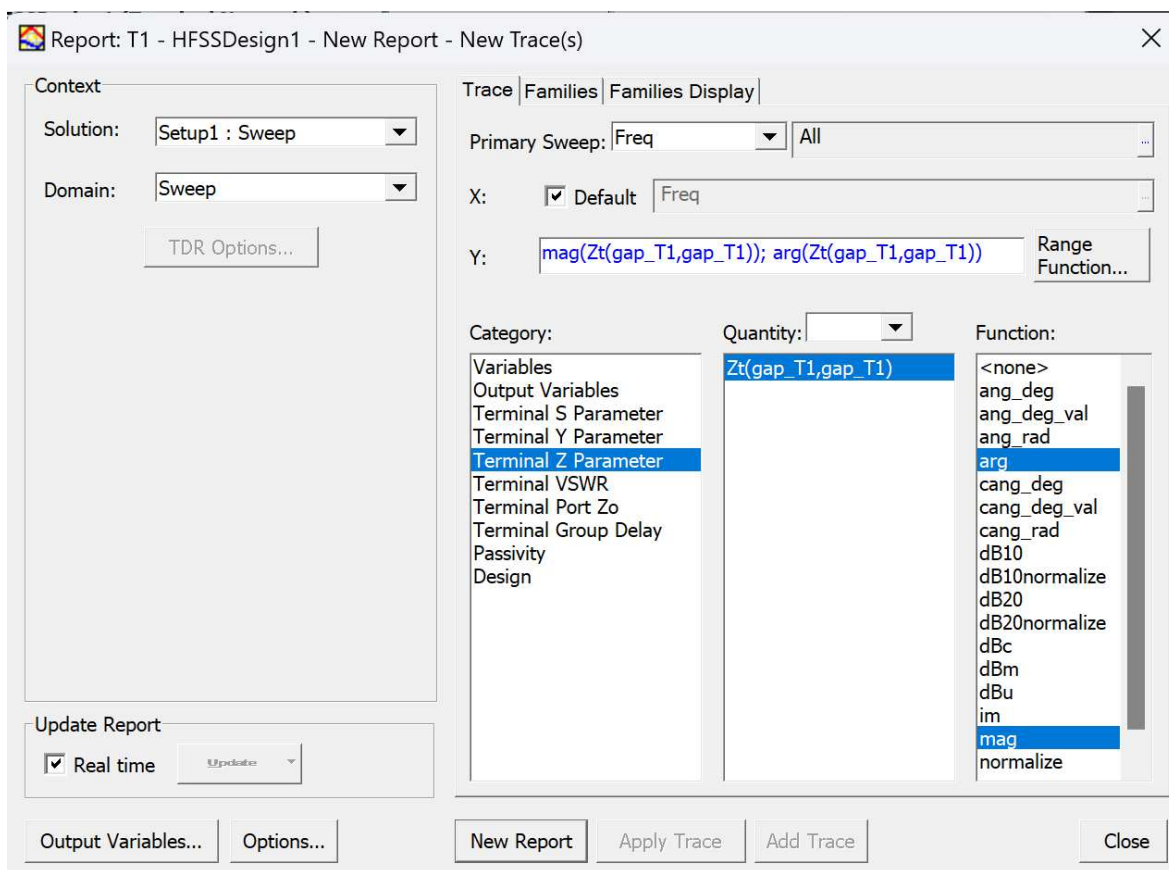
Slika 3.38. Prozor za postavljenje frekventijskog područja proračuna

Prije pokretanja simulacije dobro je za svaki slučaj provjeriti je li sve postavljeno i spremljeno, pritiskom na ikonu zelene kvačice *Validate* u *Simulation* izborniku. Ako je sve u redu pokrećemo simulaciju odmah na ikoni pored, Slika 3.39. Pokretanjem simulacije u donjem prozoru *Progress* ispod modela pojavit će se zelena traka napretka.



Slika 3.39. Ikone za provjeru modela i pokretanje simulacije

Završetkom simulacije moguće je analizirati dobivene rezultate. Pod *Results* u *Project Manager*-u desnim klikom miša odabire se *Create Terminal Solution Dana Report* te *Rectangular plot*. Za ovaj rad od interesa su bili rezultati *Z* parametri, *mag* koja predstavlja modul impedancija, dok *ang* kut impedancije, Slika 3.40.



Slika 3.40. Postavljanje izvještaja rezultata o impedanciji

Dobivene rezultate spremalo se u csv. formatu za mogućnost zajedničkog prikaza sličnih proračuna i usporedbi.

3.3. ANSYS

ANSYS Workbench okruženje omogućuje simulacije i detaljnu analizu s FEA metodama. Workbench ne radi proračune, već je to samo GUI unutar kojeg se koriste pojedini proizvodi usmjereni za jedno područje analize. U ovom radu je korišten analitički sustav *Electric*. U *Electric*-u moguće je napraviti model (*pre-processing*), provesti proračun (*solving*) te konačno analizirati same rezultate proračuna (*post-processing*).

Analiza konačnih elemenata (FEA) je način proračuna fizičkih pojava pomoću numeričke metode konačnih elemenata (FEM, *finite element method*). Fizičku pojavu predstavljamo modelom, svojstvima materijala, rubnim uvjetima. Koristi se za optimiziranje komponenata, analizu prototipova kako bi se ubrzao razvoj te smanjili troškovi. Analiza daje približna rješenja za sustav parcijalnih diferencijalnih jednadžbi. Za rješavanje zadanog sustava koristi se mreža (*mesh*) od velikog broja (u milijunima) manjih elemenata koji zajedno formiraju promatrani oblik. Proračun se radi za svaki element te se pojedinačni rezultati kombiniraju u konačno rješenje.

3.4. Maxwell

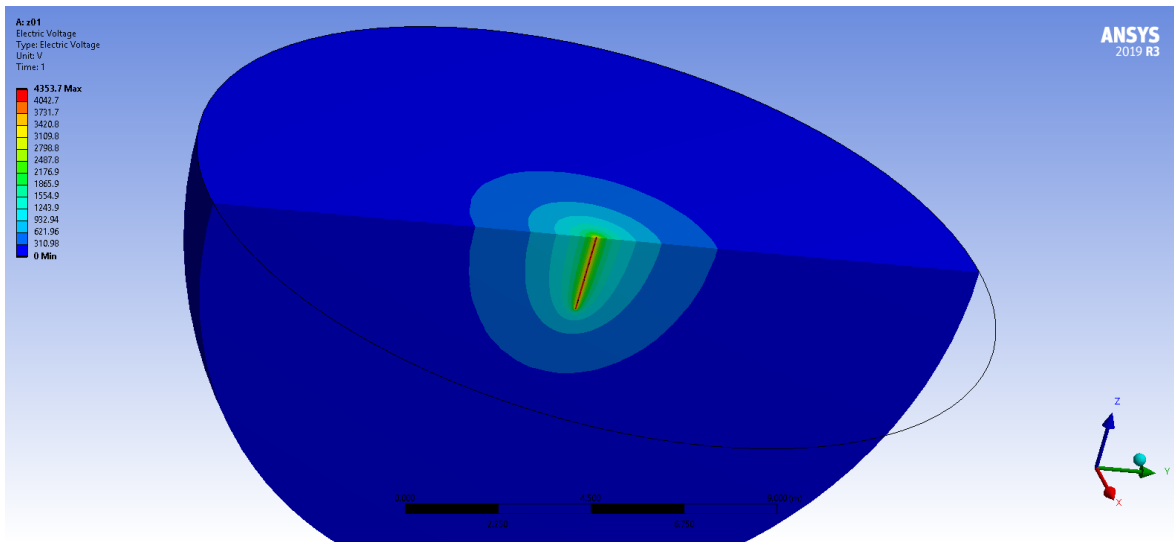
Maxwell je interaktivni softvar paket integriran u ANSYS Electronics Desktop. Koristi analizu konačnih elemenata (FEA, *finite element analysis*) za rješavanje trodimenzionalnih elektrostatskih, magnetostatskih, vrtložnih struja i prijelaznih problema.

Maxwell se može koristiti za proračune:

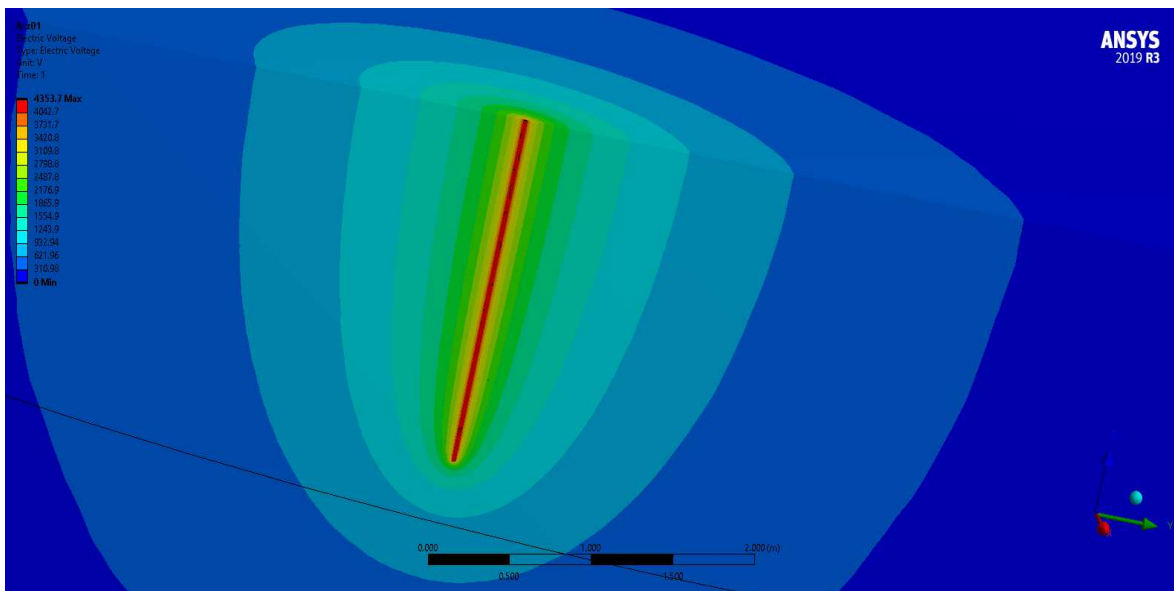
- statičkog električnog polja, sila, momenta i kapaciteta uzrokovanih raspodjelom napona i naboja;
- statičkog magnetskog polja, sila, momenta i induktiviteta uzrokovanih DC strujama, statičkim vanjskim magnetskim poljem i permanentnim magnetima;
- vremenski promjenjivog magnetskog polja, sila, momenta i induktiviteta uzrokovanih AC strujama i oscilirajućim vanjskim magnetskim poljima;
- prijelaznih magnetskih polja uzrokovanih električnim izvorima i permanentnim magnetima

4. Analiza rezultata

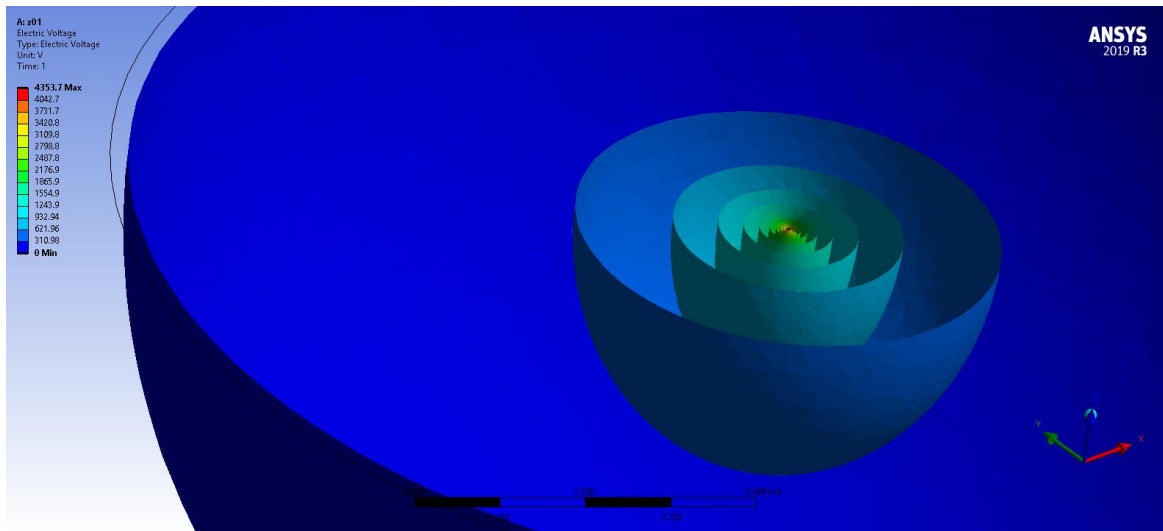
4.1. DC uzemljenje ANSYS jednoslojno tlo



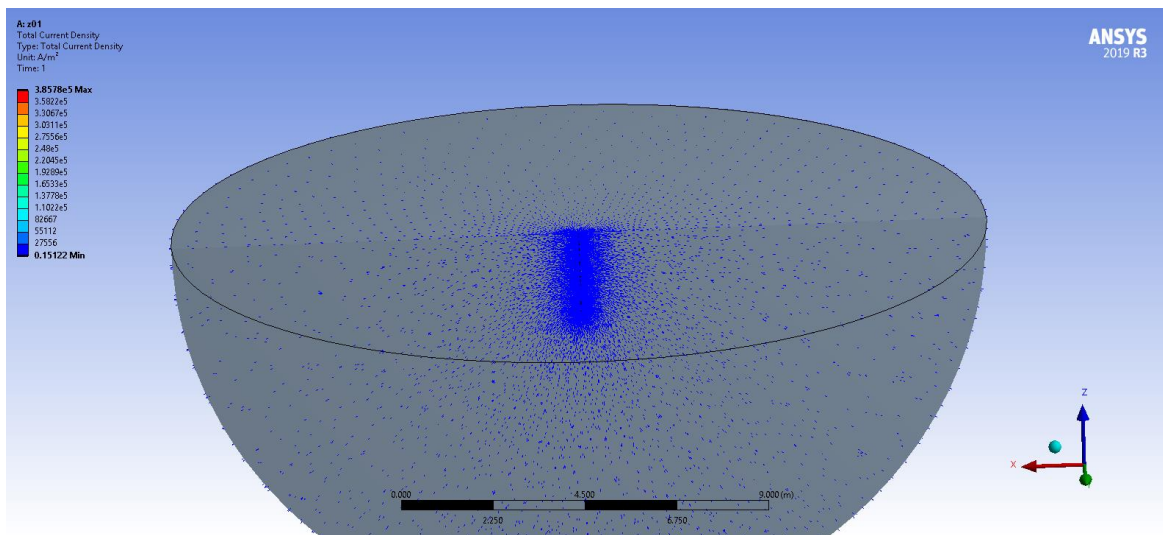
Slika 4.1. Raspodjela potencijala štapnog uzemljivača u jednoslojnom tlu, ANSYS



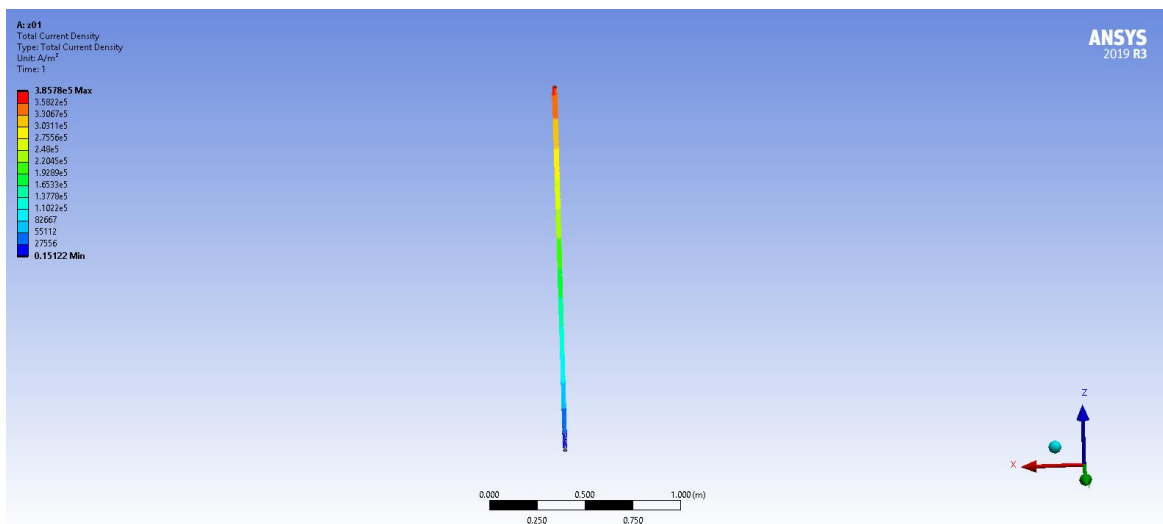
Slika 4.2. Detaljniji prikaz raspodjele potencijale oko uzemljivača u jednoslojnom tlu, ANSYS



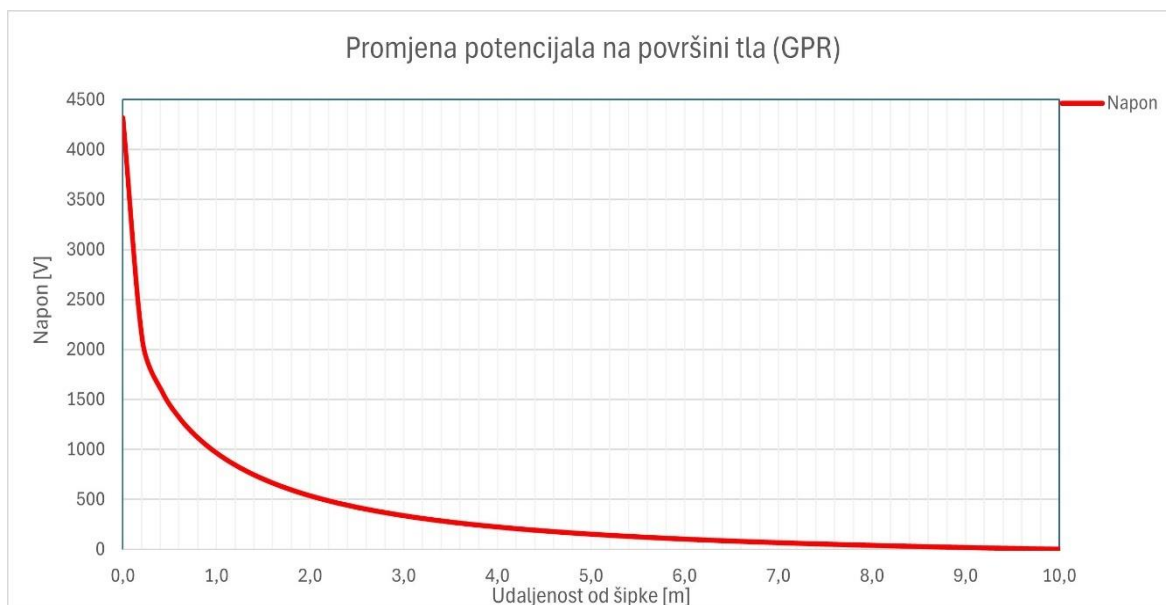
Slika 4.3. Ekvipotencijalne plohe proračuna štapnog uzemljivača u jednoslojnom tlu, ANSYS



Slika 4.4. Gustoća struje u tlu za štapni uzemljivač u jednoslojnom tlu, ANSYS



Slika 4.5. Gustoća struje u štapnom uzemljivaču u jednoslojnom tlu, ANSYS



Slika 4.6. Grafički prikaz promjene potencijala jednoslojnog tla udaljavanjem od šipke, ANSYS

Injeksijom struje u uzemljivač ona teče njime te se disipira u tlo tako da je najveća gustoća struje na početku šipke te se polagano smanjuje kako disipira u tlo. Struja stvara električno polje koje možemo prikazati ekvipotencijalnim ploham, Slika 4.1-Slika 4.3, kao što je objašnjeno i prikazano Slika 1.6. Polje polagano iščezava prema kraju sfere koja predstavlja beskonačno tlo, što je grafički vidljivo na Slika 4.6 i izgleda kao jedna strana naponskog lijevka. Iz istog grafa moguće je iščitati napon dodira razlikom napona na udaljenosti nula (0) i jedan (1) metar od šipke u iznosu od 3383 V.

Uspješnost zaštite u ovom radu nije presudna. Od značaja su dobiveni otpori, kako će se mijenjati otpor s frekvencijom, da dobivena vrijednost u stacionarnom modelu bude jednaka impedanciji tranzijentnog modela u otpornom području te razlike kod različitih vodljivosti. Iz tog razloga otpor uzemljenja odredit ćemo na dva načina, jednadžbom (1.7) za otpor štapnog uzemljivača i dobivenim podacima proračunom. Prema proračunu simulacije iz maksimalnog napona i struje pobude:

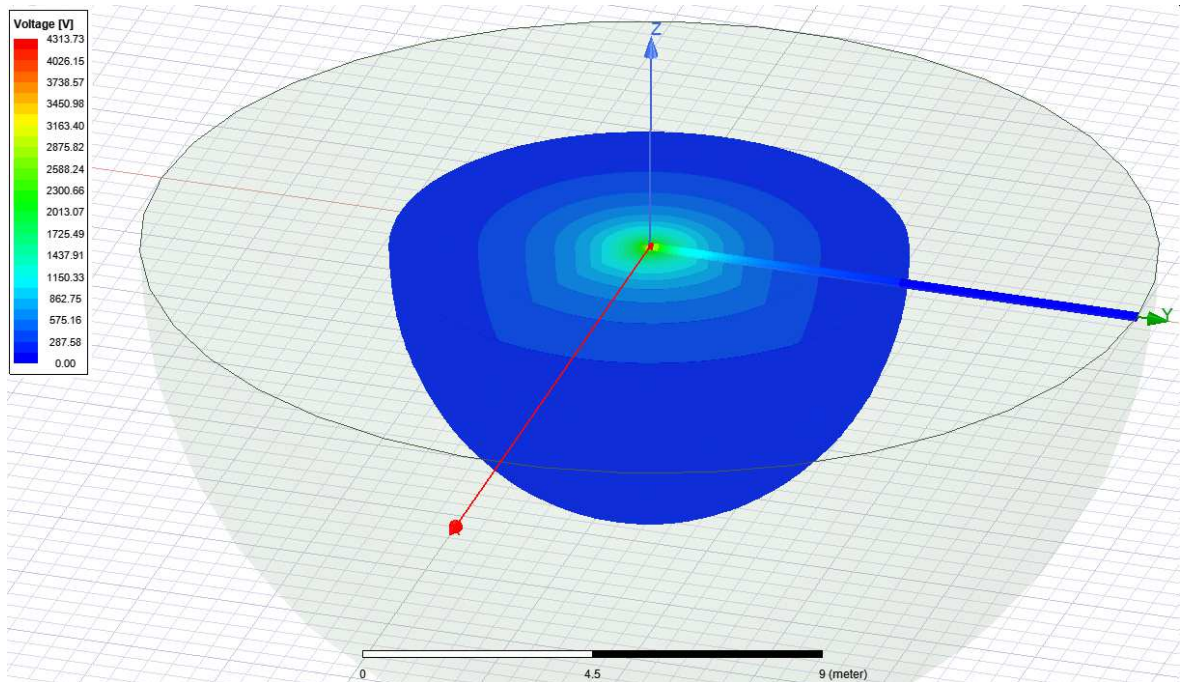
$$R_{DC} = \frac{U_{max}}{I} = \frac{4352.7}{100} = 43.5\Omega$$

, dok prema jednadžbi dobivamo

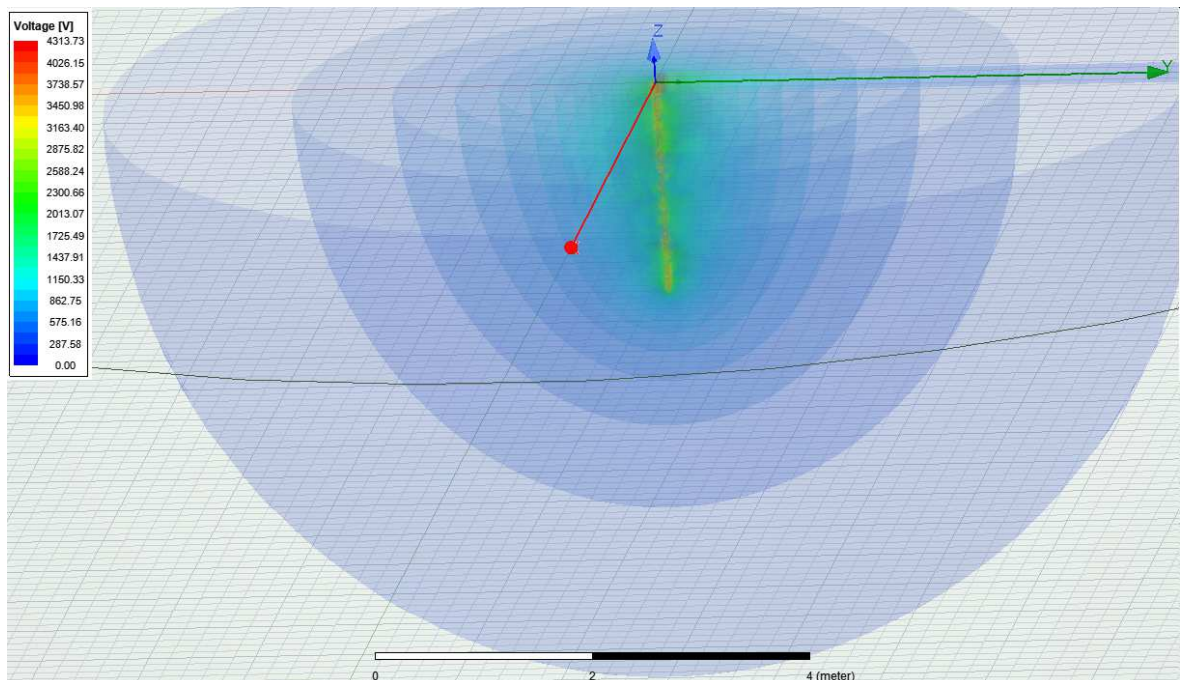
$$R_{DC} = \frac{\rho}{2\pi l} \ln \frac{4l}{d} = 47.7\Omega$$

4.2. DC uzemljenje Maxwell jednoslojno tlo

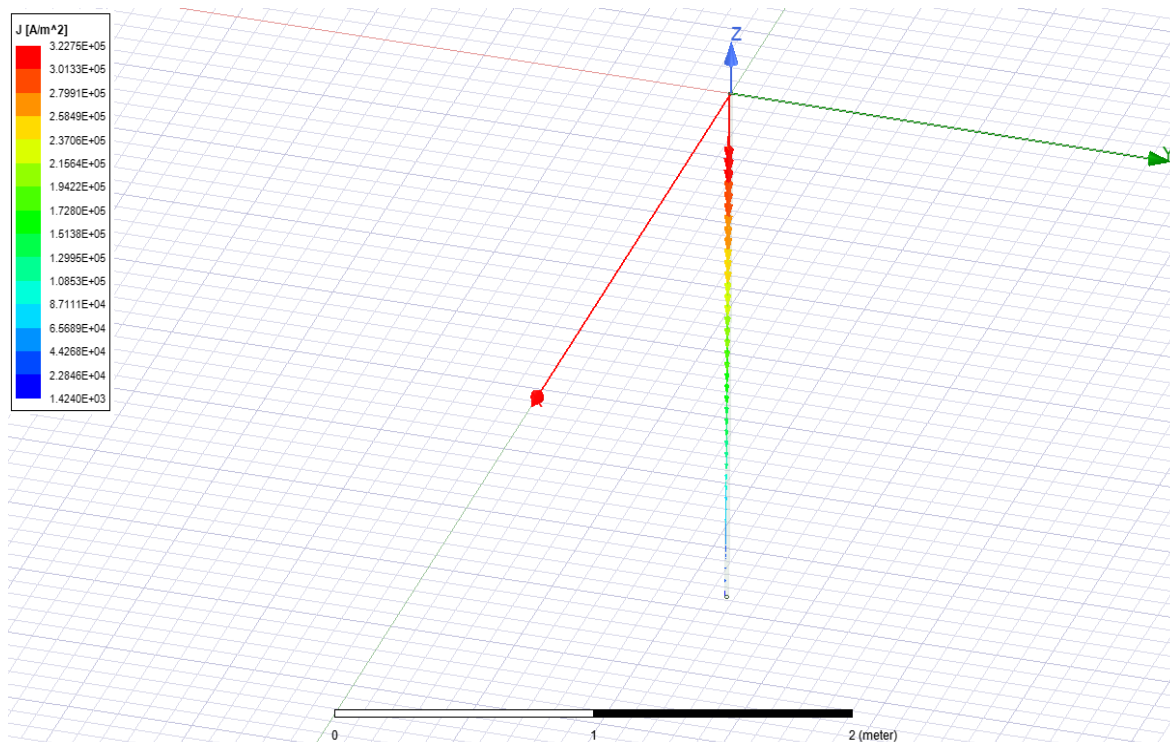
Jednak model kao u ANSYS-u napravljen je u Maxwellu te su dobiveni idući rezultati.



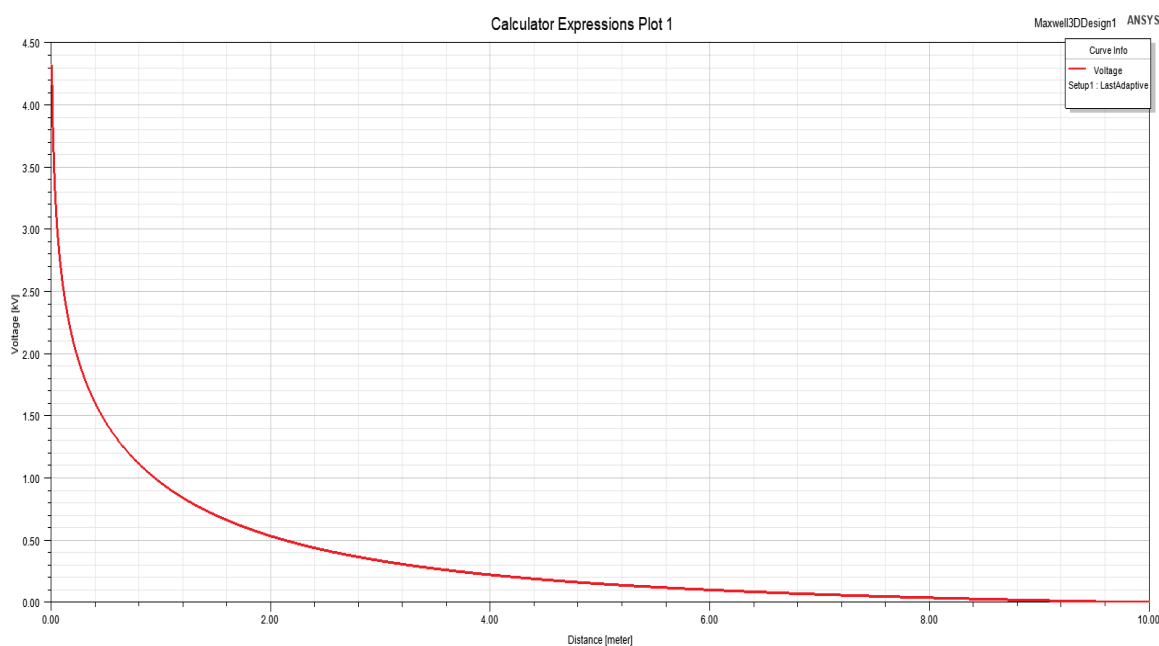
Slika 4.7. Raspodjela potencijala štapnog uzemljivača u jednoslojnom tlu, Maxwell



Slika 4.8. Detaljniji prikaz raspodjele potencijale oko uzemljivača u jednoslojnom tlu s ekvipotencijalnim plohamama, Maxwell



Slika 4.9. Gustoća struje u štapnom uzemljivaču u jednoslojnom tlu, Maxwell

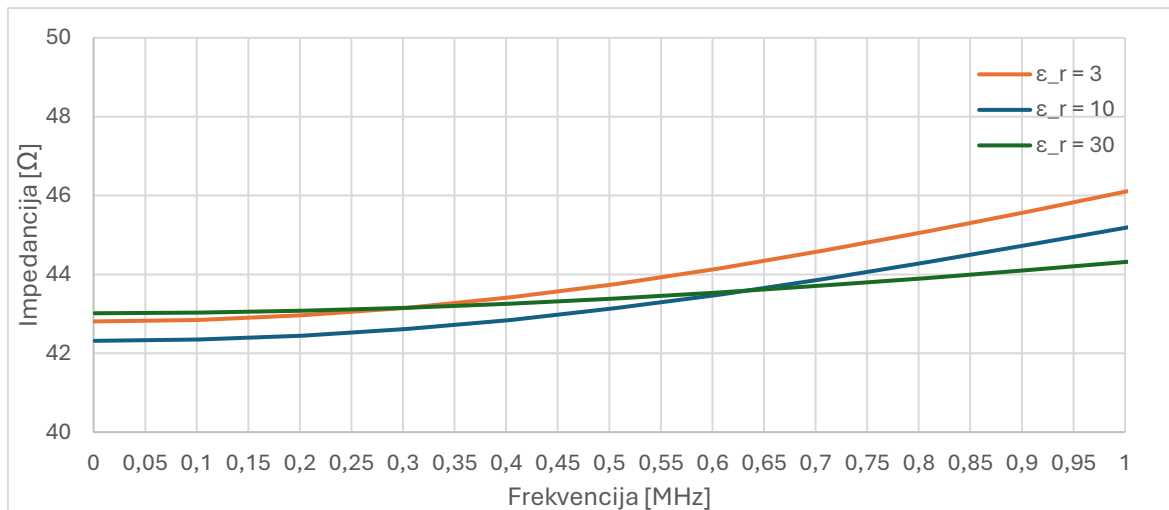


Slika 4.10. Grafički prikaz promjene potencijala jednoslojnog tla udaljavanjem od šipke, Maxwell
 Rezultati su istovjetni dobivenima u ANSYS-u te se neće duljiti s analizom. Jedino je određen otpor uzemljivačkog sustava iz dobivenog maksimalnog napona i iznosi

$$R_{DC} = \frac{U_{max}}{I} = \frac{4313.7}{100} = 43.1\Omega$$

4.3. AC uzemljenje HFSS jednoslojno tlo

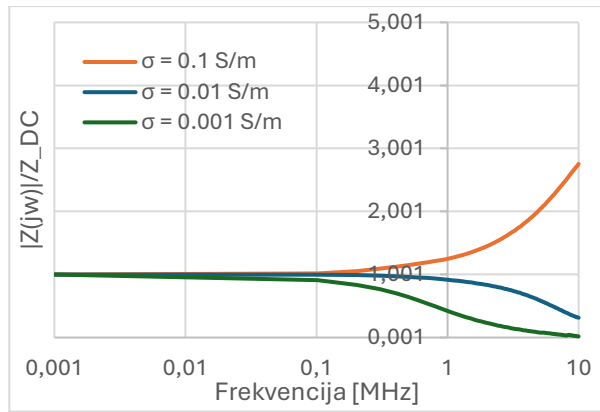
Za početak napravljena je validacija modela usporedbom dobivenih vrijednosti otpora u DC modelu s impedancijom na nižim frekvencija promatranog spektra u HFSS modelu.



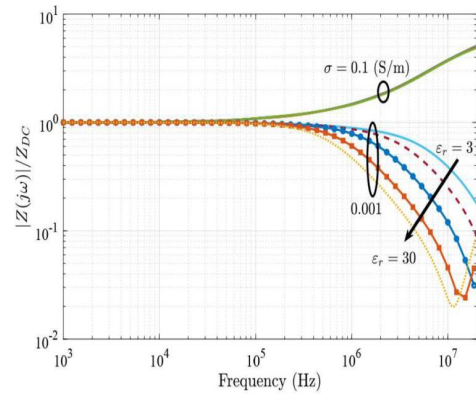
Slika 4.11. Impedancija na niskim frekvencija za tlo $\sigma=0.01$ S/m

Iz grafa sa Slika 4.11. iščitavaju se početna impedancija od 42.8 Ω, 42.3 Ω i 43.0 Ω ovisno o permitivnosti. Navedene vrijednosti se poklapaju s vrijednostima iz DC proračuna u ANSYS-u od 43.5 Ω i od 43.1 Ω Maxwella. Time se potvrđuje valjanost modela na niskim frekvencijama.

Vjerujući u točnost proračuna u [8], kao što je već rečeno i opisano model za frekventnu analizu u programu HFSS rađen je prema onomu iz navedenog rada. Za provjeru istovjetnost dvaju modela napravljena je validacija usporedbom rezultata proračuna. Model u radu [8] nešto je drugačijih dimenzija pa se rađeni model za diplomski rad prilagodio. Korištene dimenzije za validaciju su: šipka radijusa 12.5 mm i duljine 1 m te visina izvora 10 mm. Za parametre tla postavljena je relativna permitivnost 30, dok je za vodljivost postavljeno nekoliko vrijednosti: 0.1, 0.01 i 0.001 S/m. Opaska, skala prilikom iduće usporedbe je logaritamska.

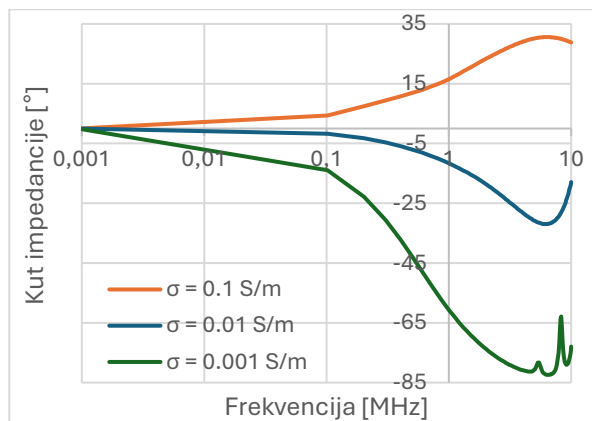


(a)

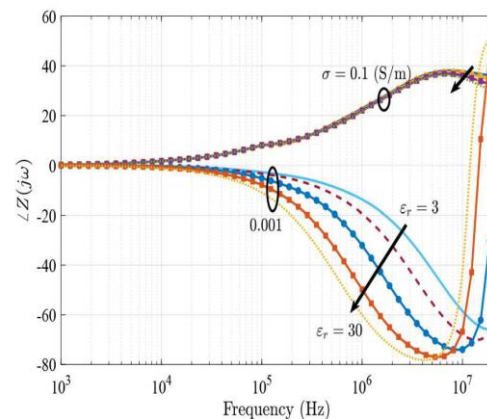


(b)

Slika 4.12. Usporedba impedancija za validaciju modela: a) model korišten u diplomskom radu, (b) model korišten u [7]



(a)

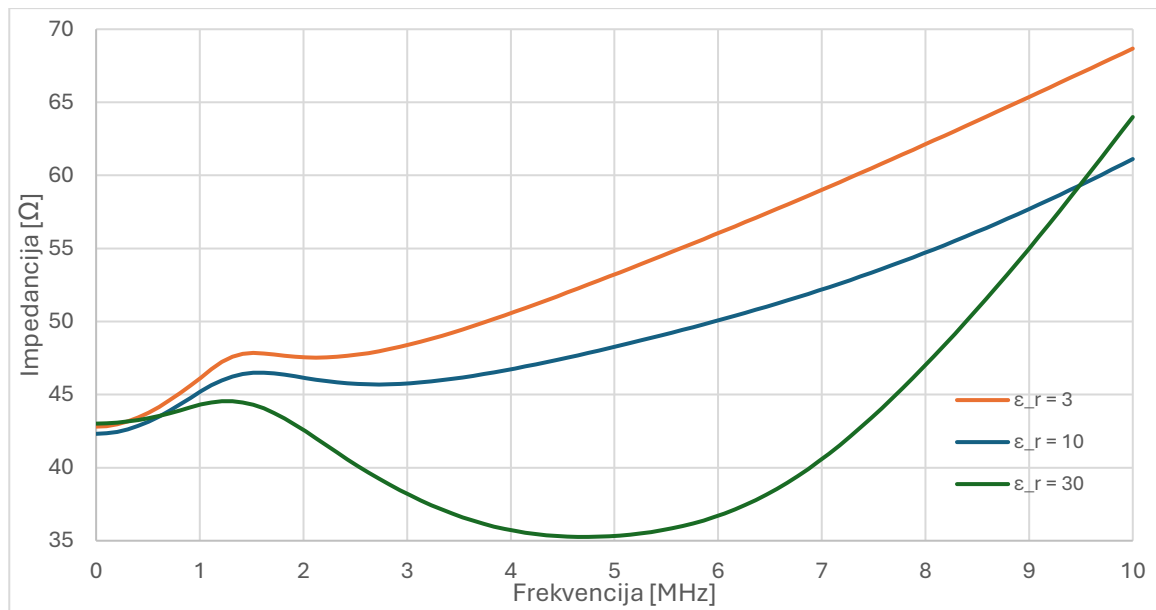


(b)

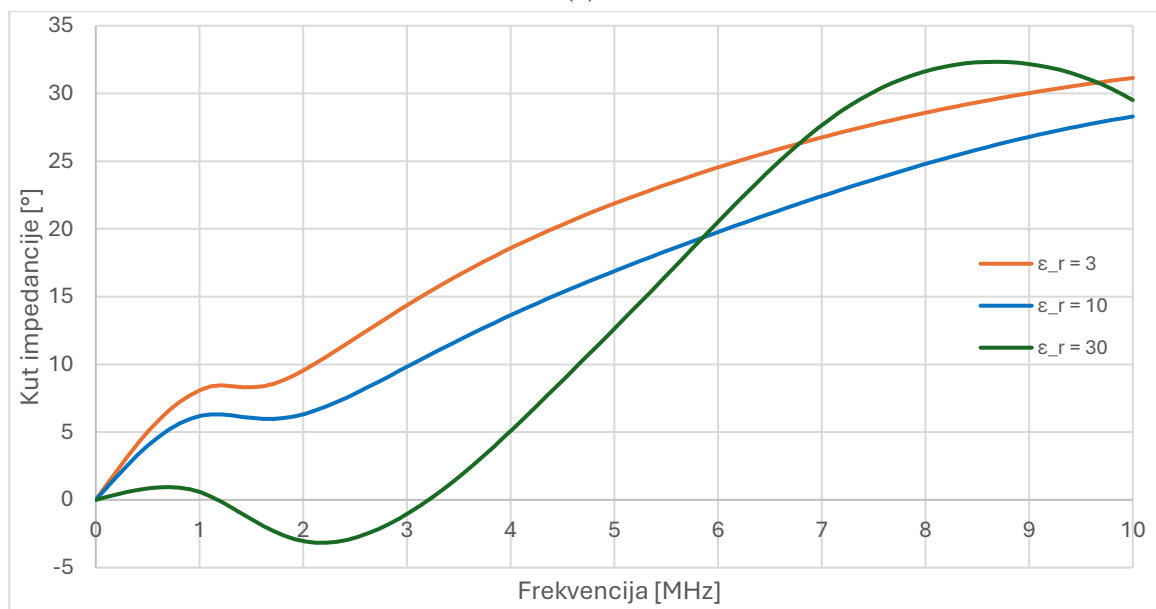
Slika 4.13. Usporedba impedancija za validaciju modela: (a) model korišten u diplomskom radu, (b) model korišten u [7]

Grafičkom usporedbom dobivenih rezultata na Slika 4.12 i Slika 4.13 zaključuje se da modeli daju jednaki trend i vrijednosti za većinu promatranog spektra, razlika nastaje na gornjoj granici spektra kod frekvencije od 10 MHz. Ovime se potvrđuje valjanost napravljenog modela te se nastavlja s daljnjim proračunima s osnovnim dimenzijama modela opisanim u poglavlju 3.1.

U analizi napravljano je nekoliko simulacija promjenom utjecajnih parametara na impedanciju uzemljivačkog sustava. Proučava se utjecaj različitih vodljivosti i relativnih permitivnosti tla, utjecaj frekventno ovisnih parametara tla, duljina te radijus uzemljivačke šipke. Za početak će se proučavati različite vodljivosti tla.



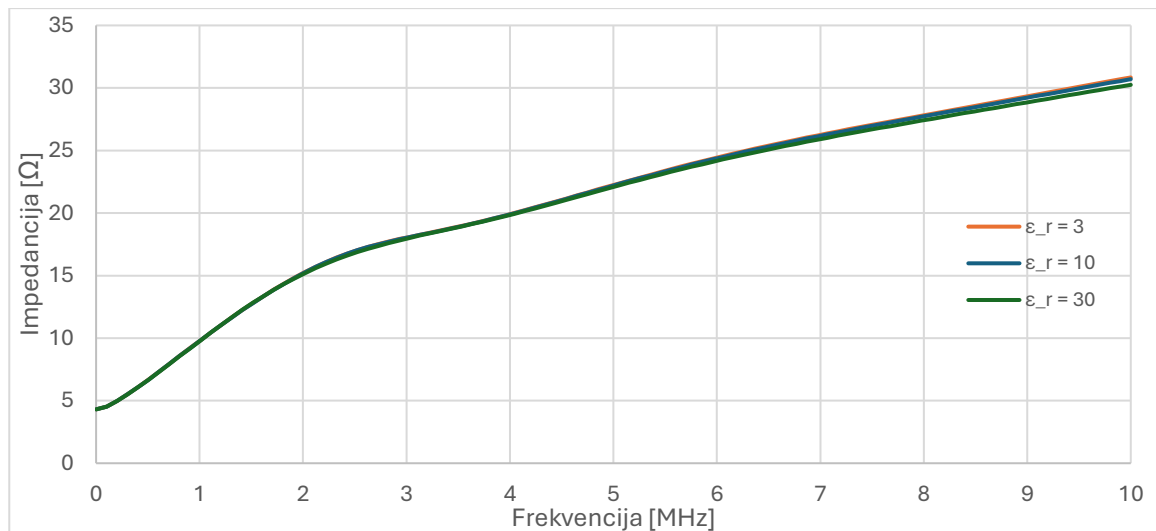
(a)



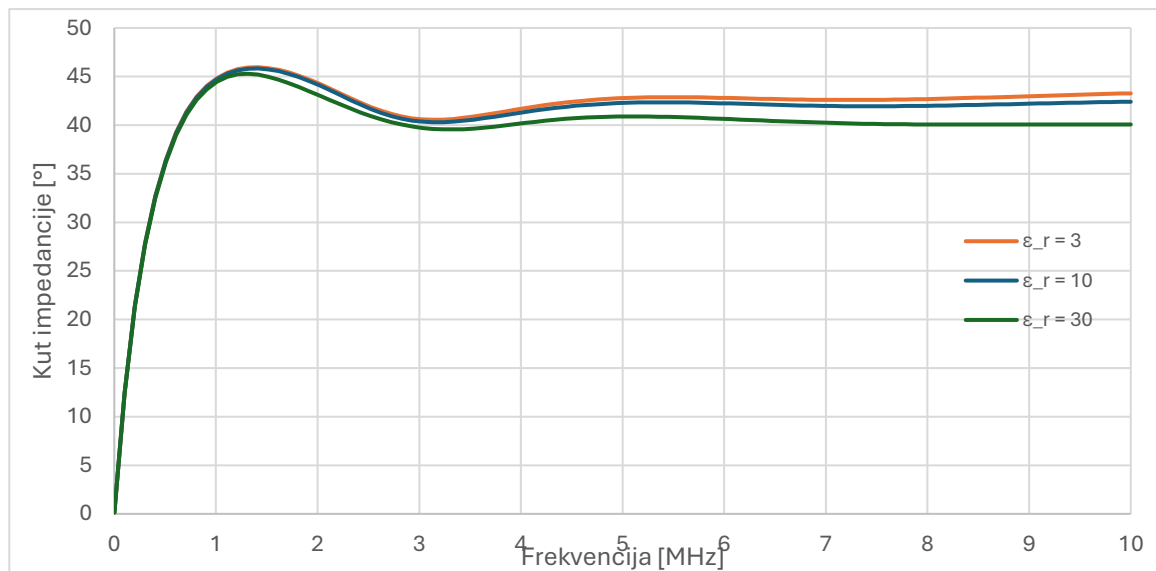
(b)

Slika 4.14. Promjena (a) amplitude i (b) kuta impedancije s frekvencijom za tlo $\sigma = 0.01$ S/m i $\epsilon_r=3$, 10 i 30

Za gornje rezultate parametri su jednaki onima u DC proračunima. Impedancija raste i kut se povećava što je karakteristika induktivnog ponašanja što je bilo i pretpostavljeno za tlo srednje vodljivosti, Slika 2.10. S većom permitivnosti početni rast je manji, čak i impedancije počinje početno padati, jer ona utječe na kompleksnu vodljivost i povećava ju, no kasnije i prerasta proračune s manjom permitivnosti. Karakteristična frekvencija promatranog uzemljivača prema grafu sa Slika 2.12. iznosila bi oko 1 MHz što se poklapa s proračunom.



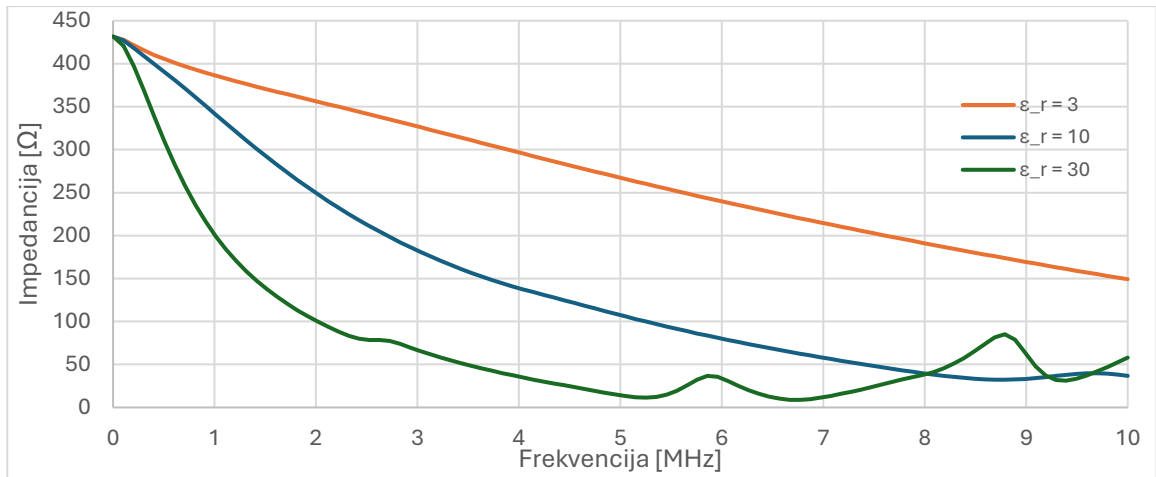
(a)



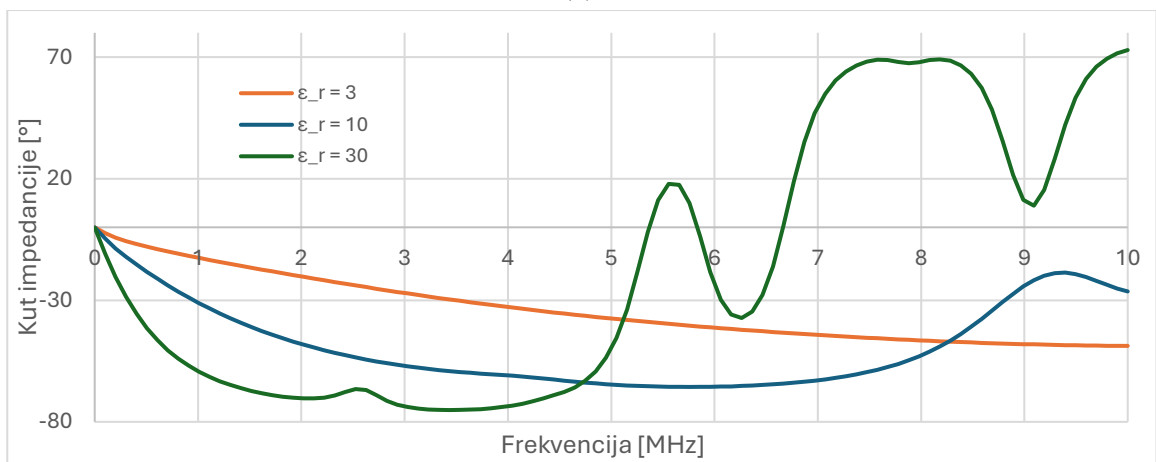
(b)

Slika 4.15. Promjena (a) amplitude i (b) kuta impedancije s frekvencijom za tlo $\sigma = 0.1$ S/m i $\epsilon_r = 3, 10$ i 30

Povećanjem vodljivosti tla deset puta na 0.1 S/m smanjuje se početna impedancija, odnosno otpor uzemljivačkog sustava. Frekvencijska ovisnost poprma samo induktivni karakter te postotno najviše raste. Vidljivo je kako za različite permitivnosti poprma jednake vrijednosti odnosno da ona nije utjecajan faktor čime se potvrđuje rečeno o visoko vodljivim tlima. Karakteristična frekvencija je manja, približno 100 kHz i impedancija mnogo ranije kreće rasti. S druge strane smanjenjem vodljivosti deset puta na 0.001 S/m povećava se početna impedancije i takvo visoko otporno tlo ima kapacitivni karakter. Iz toga razloga impedancija pada s frekvencijom, a kut poprma negativnu vrijednost, Slika 4.16. Izražen je utjecaj permitivnosti na način da veća vrijednost stvara izraženije kapacitivno ponašanje.

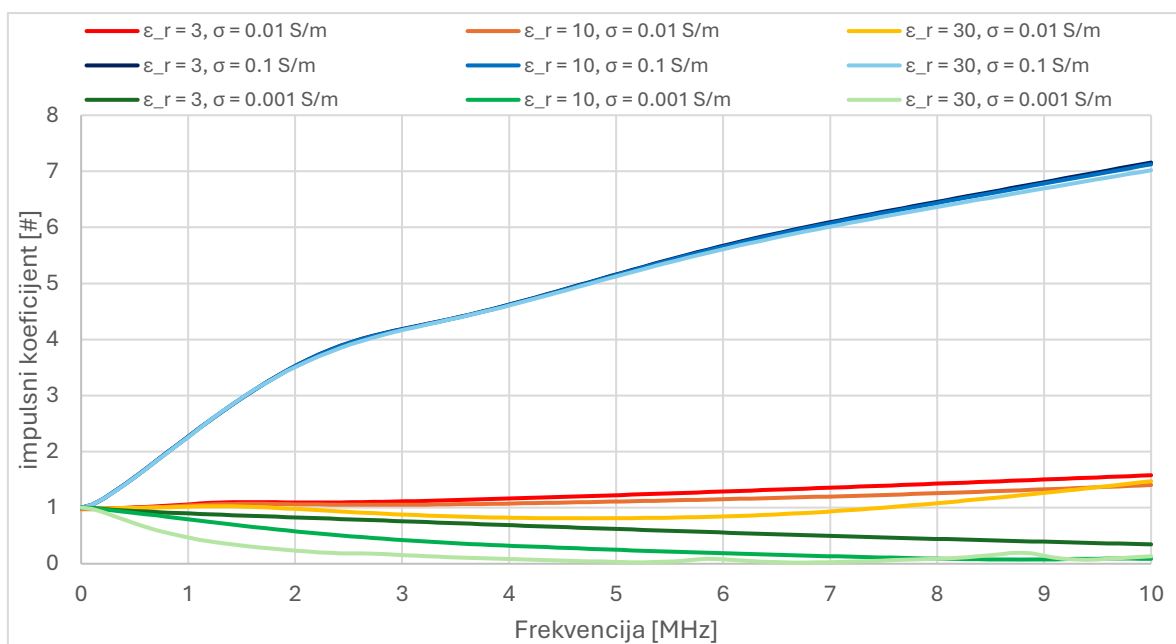


(a)



(b)

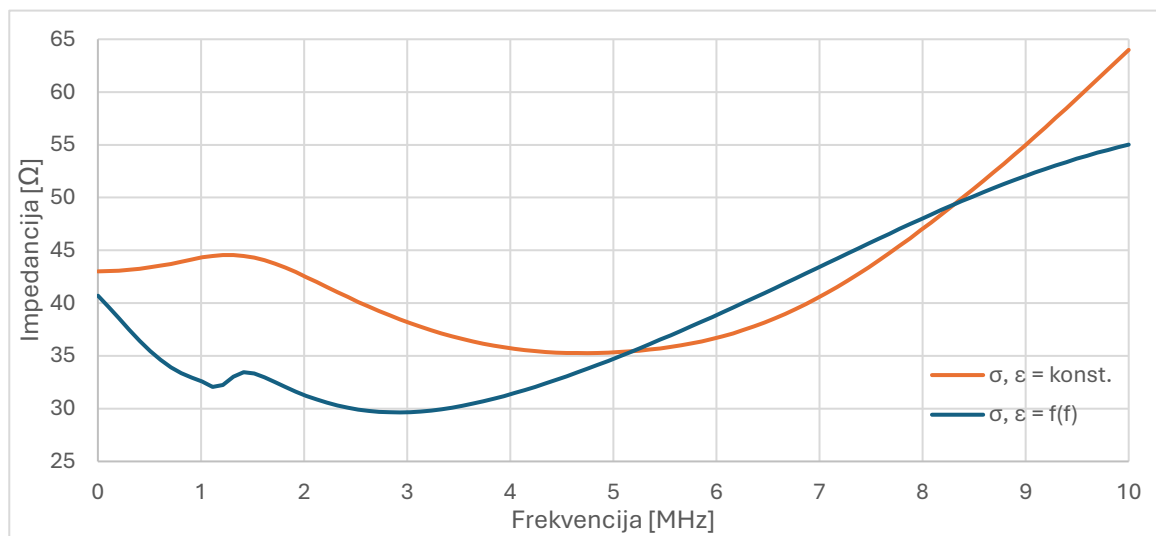
Slika 4.16. Promjena (a) amplitude i (b) kuta impedancije s frekvencijom za tlo $\sigma=0.001$ S/m i $\epsilon_r=3, 10$ i 30



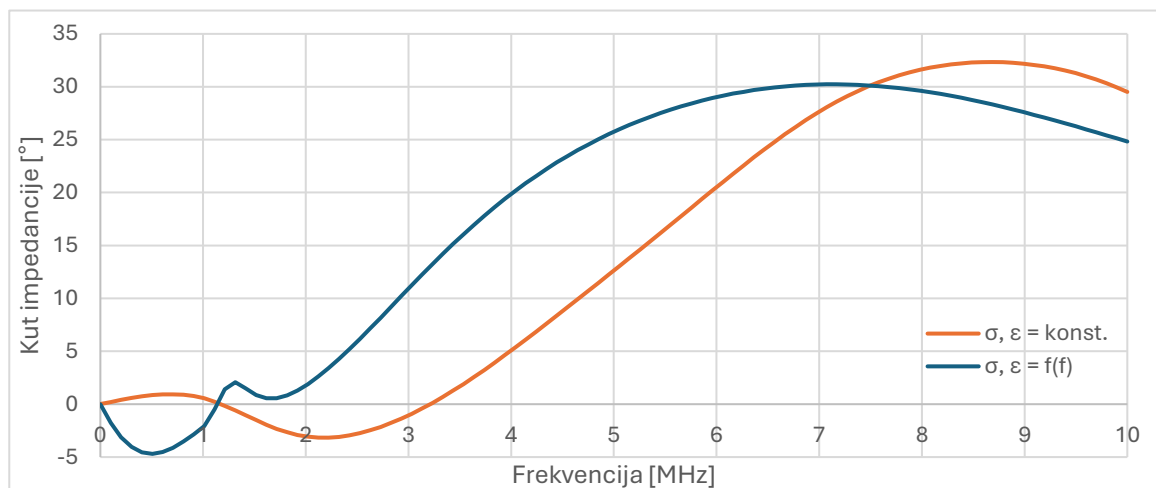
Slika 4.17. Usporedba impulsnih koeficijenata za sve vodljivosti i permitivnosti

Slika 4.17. na jednom mjestu prikazan je utjecaj vodljivost tla na promjenu impedancije s frekvencijom, a uz to i permitivnosti. Potvrđuje se teorijska pozadina da visoko vodljiva tla imaju izražen induktivni karakter, dok nisko vodljiva tla kapacitivni. Također da je permitivnost važna jedino kod tla niske vodljivosti.

Iduće je napravljena usporedba kada se uzima u obzir frekvencijska ovisnost parametara tla u odnosu kada su parametri konstantni. Parametri se mijenjaju prema grafovima na Slika 3.27 i Slika 3.28.



(a)

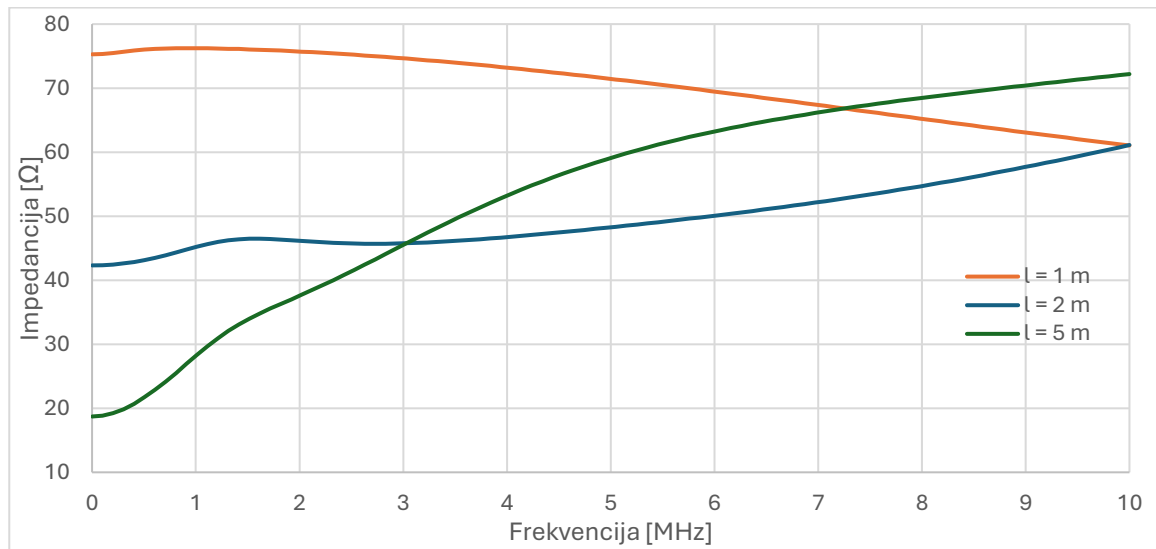


(b)

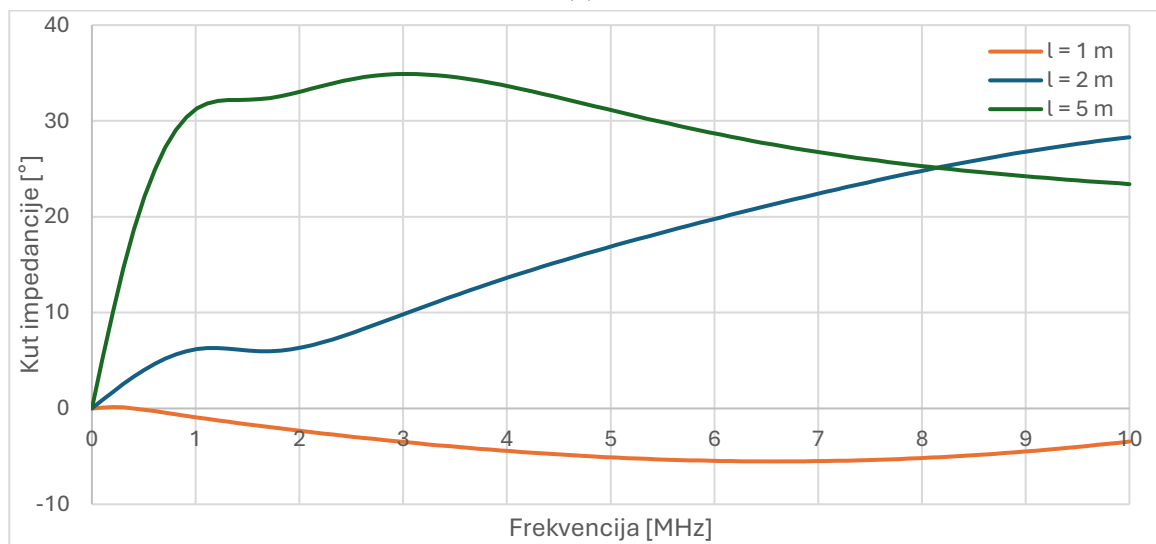
Slika 4.18. Promjena (a) amplitude i (b) kuta impedancije s frekvencijom za frekventno ovisno tlo i tlo s konstantnim parametrima $\epsilon_r=30$, $\sigma=0.01$ S/m

Vidljivo je da korištenje frekventno ovisnih parametara daje niže vrijednosti impedancije jer vodljivost raste, a i permitivnost je početno veća i daje kapacitivni karakter. Prema tome

može se reći da u slučaju ne razmišljanja o ovoj ovisnosti moguće je predimensionirati sustav.



(a)

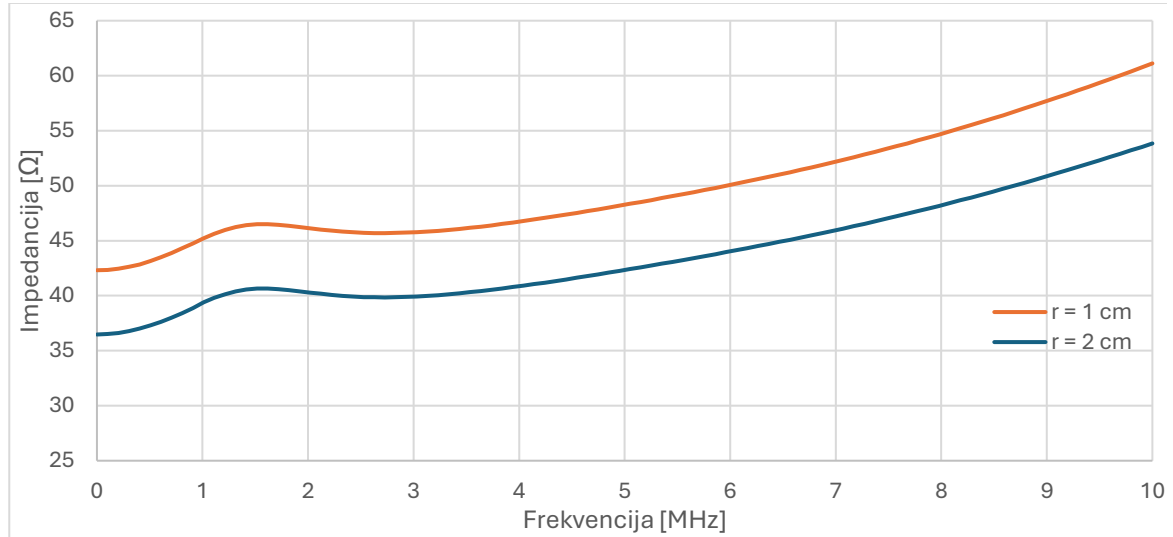


(b)

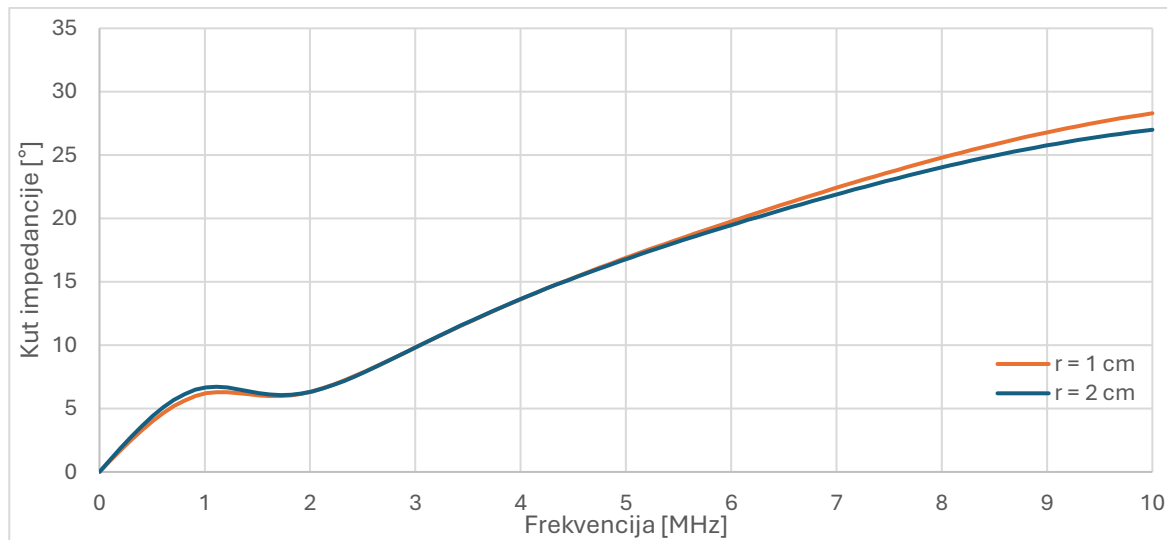
Slika 4.19. Promjena (a) amplitude i (b) kuta impedancije s frekvencijom u tlu $\epsilon_r=10$, $\sigma=0.01$ S/m, za šipke različite duljine $l=1, 2$ i 5 m

Duljina šipke izrazito utječe na otpor šipke, Slika 1.8., također utječe i na karakteristiku ponašanja te karakterističnu frekvenciju. Ovisno o vodljivosti tla, povećanjem duljine šipke na određenoj duljini dolazi do prijelaza s kapacitivnog na induktivni karakter, Slika 2.10. Prema tome, iako kraća šipka uzrokuje veći DC otpor uzemljivačkom sustavu jer je manja površina širenja struje iz šipke prema tlu, s frekvencijom će impedancija padati jer ima kapacitivni karakter. S druge strane dulje šipke imaju početno manji otpor, ali zbog induktivnog karaktera impedancija raste. Time se može dogoditi kao što je i prikazano na

Slika 4.19.(a) da kraća šipka na VF postiže efikasnije uzemljenje. Usporedbom šipka koje imaju induktivni karakter, od 2 i 5 metara, zaključuje se da što je šipka dulja induktivno ponašanje je izraženije. Sa gornje slike također je vidljivo da kraće šipke dulje zadržavaju otpornički karakter odnosno da je karakteristična frekvencija veća.



(a)



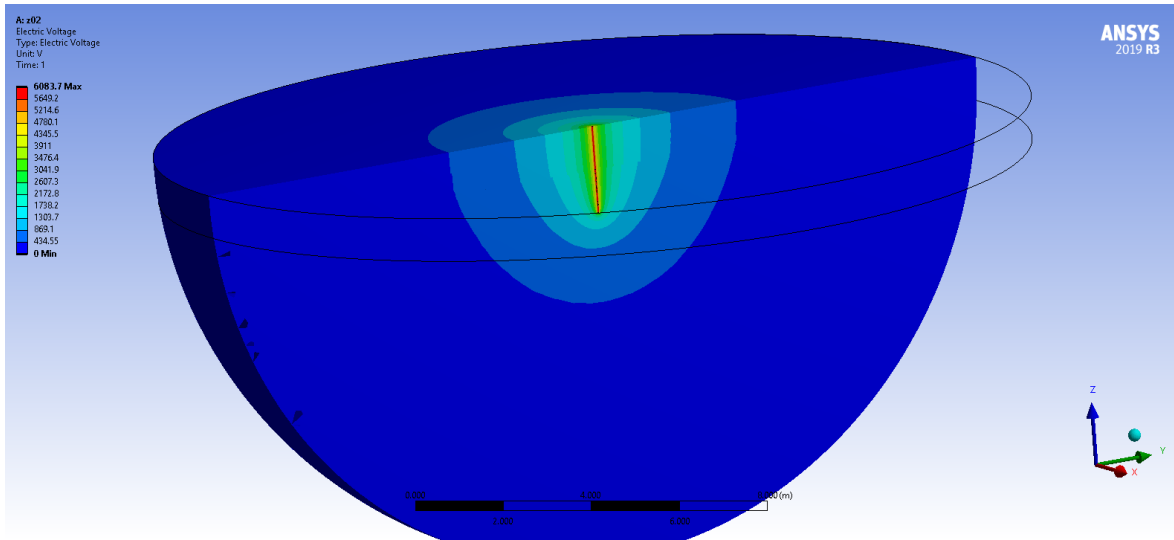
(b)

Slika 4.20. Promjena (a) amplitude i (b) kuta impedancije s frekvencijom u tlu $\epsilon_r=10$, $\sigma=0.01$ S/m, za šipke različitog polumjera $r=1, 2$ cm

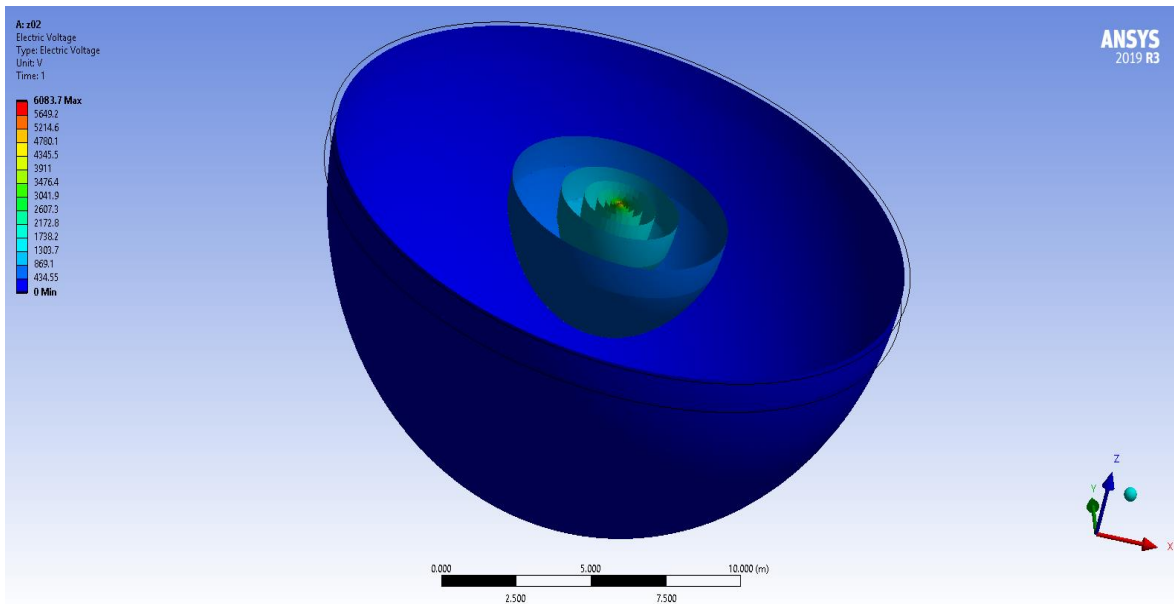
Promjena radijusa uzemljivačke šipke ima utjecaj na početnu vrijednost impedancije gdje je za dvostruko tanju šipku veća. Promjenom frekvencije impedancija će rasti u oba slučaja jednakim trendom, odnosno različit radijus nema utjecaj na karakter impedancije s promjenom frekvencije.

4.4. DC uzemljenje ANSYS dvoslojno tlo

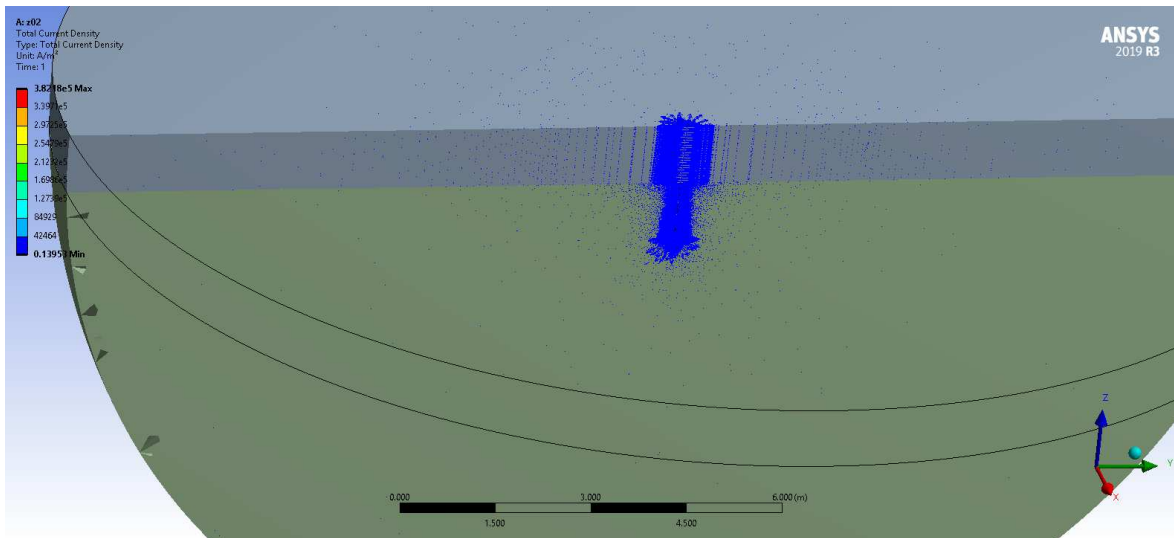
Kao i za jednoslojno tlo napravljeni su modeli i proračuni u programima ANSYS i Maxwell kao referentne vrijednosti za validaciju HFSS modela na niskim frekvencijama.



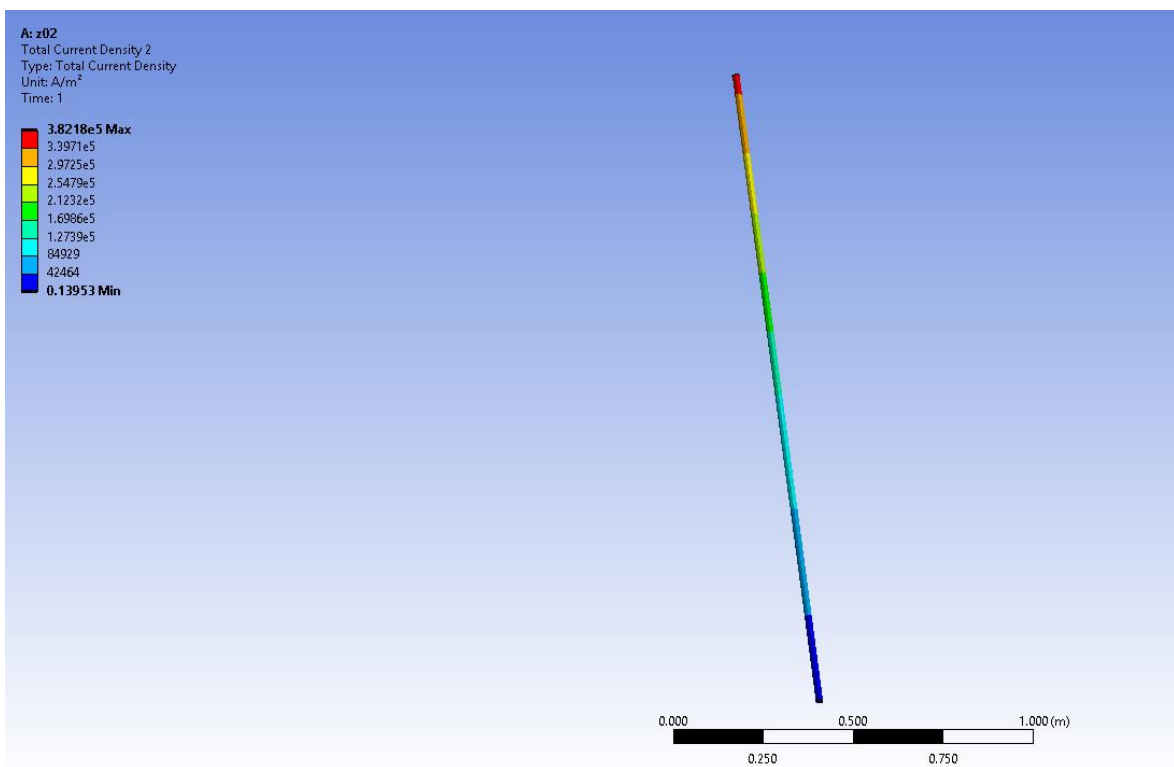
Slika 4.21. Raspodjela potencijala štapnog uzemljivača u dvoslojnom tlu, ANSYS



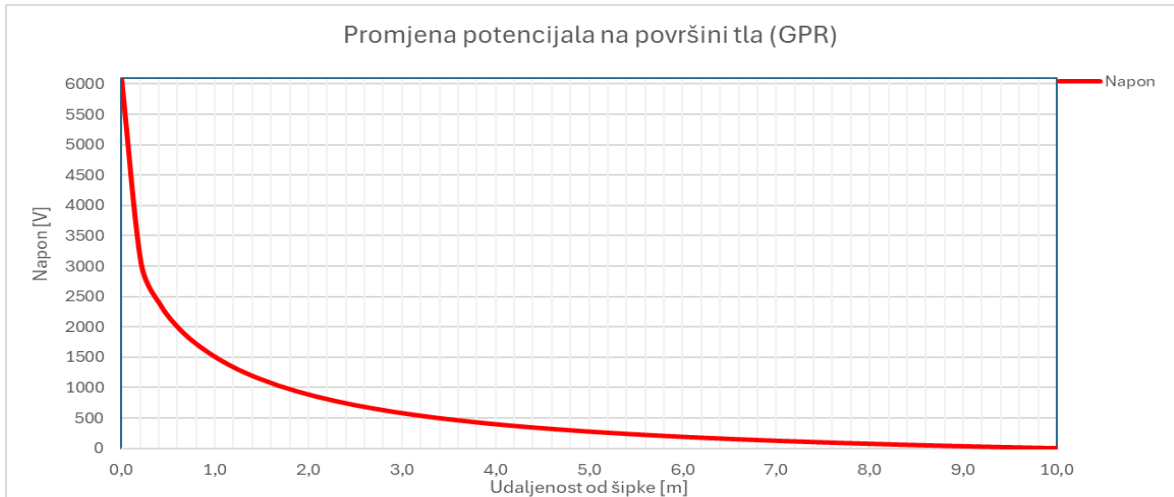
Slika 4.22. Ekvipotencijalne plohe proračuna štapnog uzemljivača u dvoslojnom tlu, ANSYS



Slika 4.23. Gustoća struje u tlu za štapni uzemljivač u dvoslojnom tlu, ANSYS



Slika 4.24. Gustoća struje u štapnom uzemljivaču u dvoslojnom tlu, ANSYS

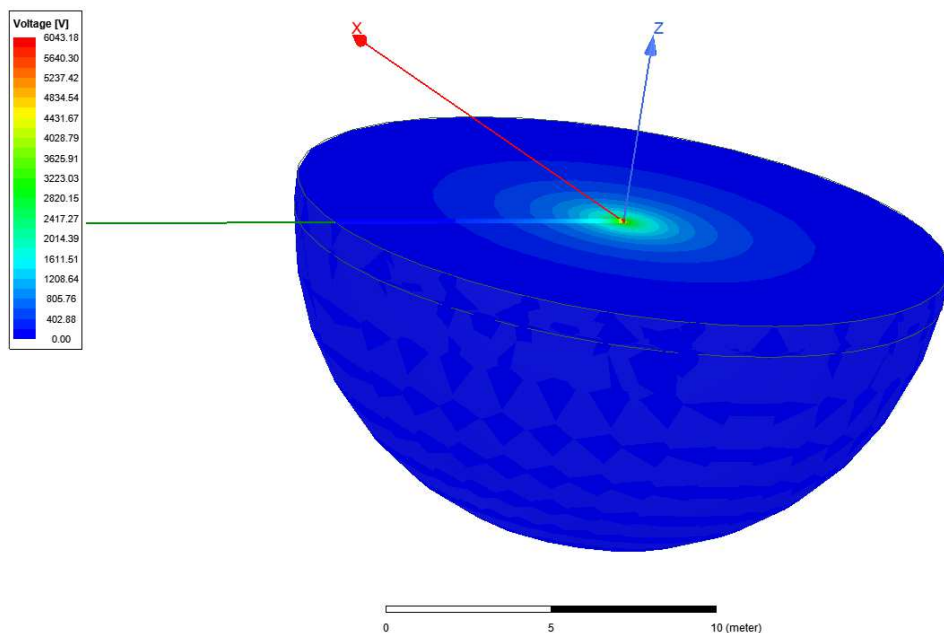


Slika 4.25. Grafički prikaz promjene potencijala dvoslojnog tla udaljavanjem od šipke, ANSYS

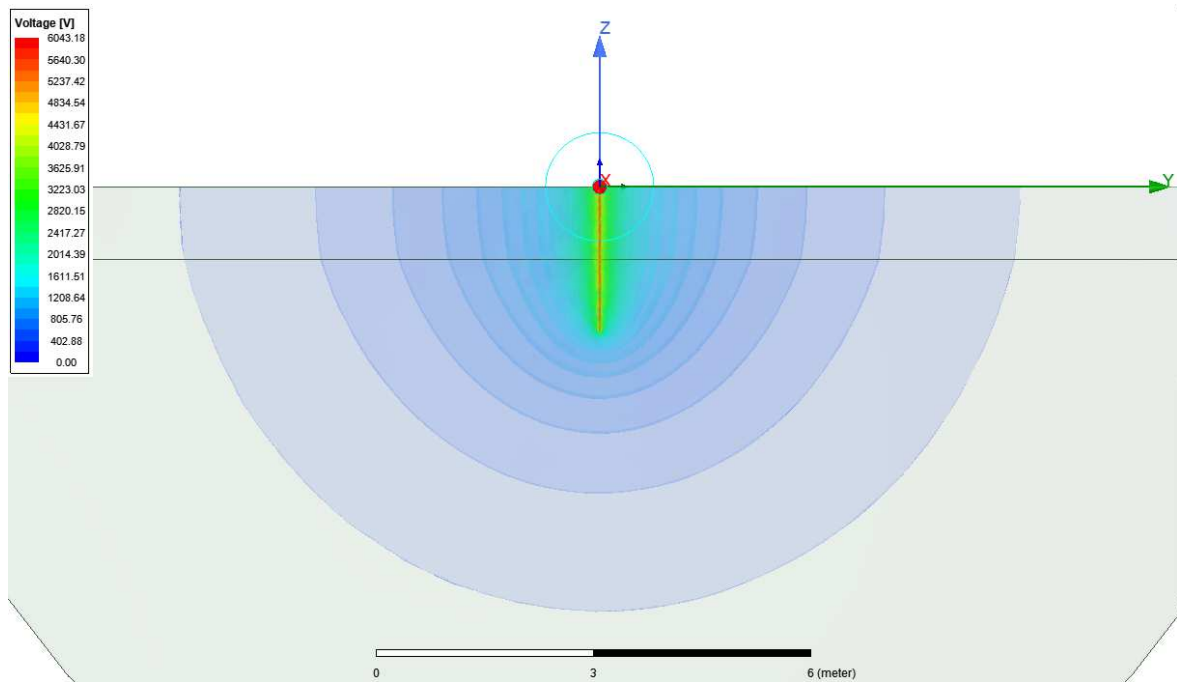
Primjećuje se slično ponašanje uzemljenja kao i u slučaju jednoslojnog tla. Razlika nastaje zbog donjeg sloja koji je manje vodljivosti. Vidljivo je da na prijelazu u donji sloj ekvipotencijalne plohe postaju malo bliže šipci, odnosno potencijal brže opada. Time se povećava otpornost sustava također i naponi dodira i koraka. Struja se lakše dissipira u vodljivijim sloju tako da je njena gustoća i veća u gornjem sloju. Otpor ovog uzemljivačkog sustava iznosi:

$$R_{DC} = \frac{U_{max}}{I} = \frac{6083.7}{100} = 60.8\Omega$$

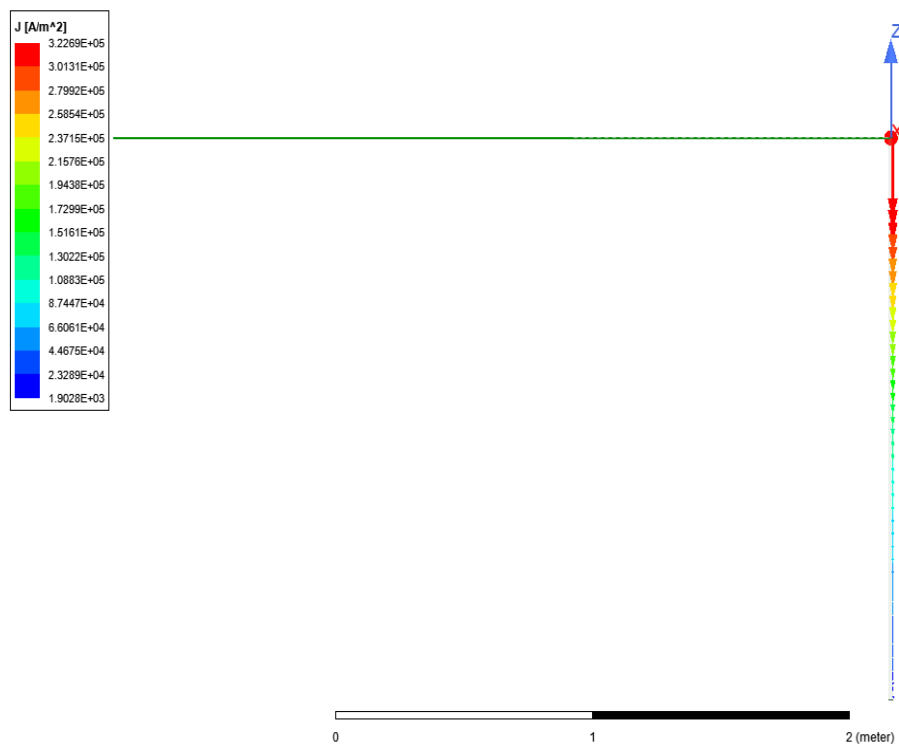
4.5. DC uzemljenje Maxwell dvoslojno tlo



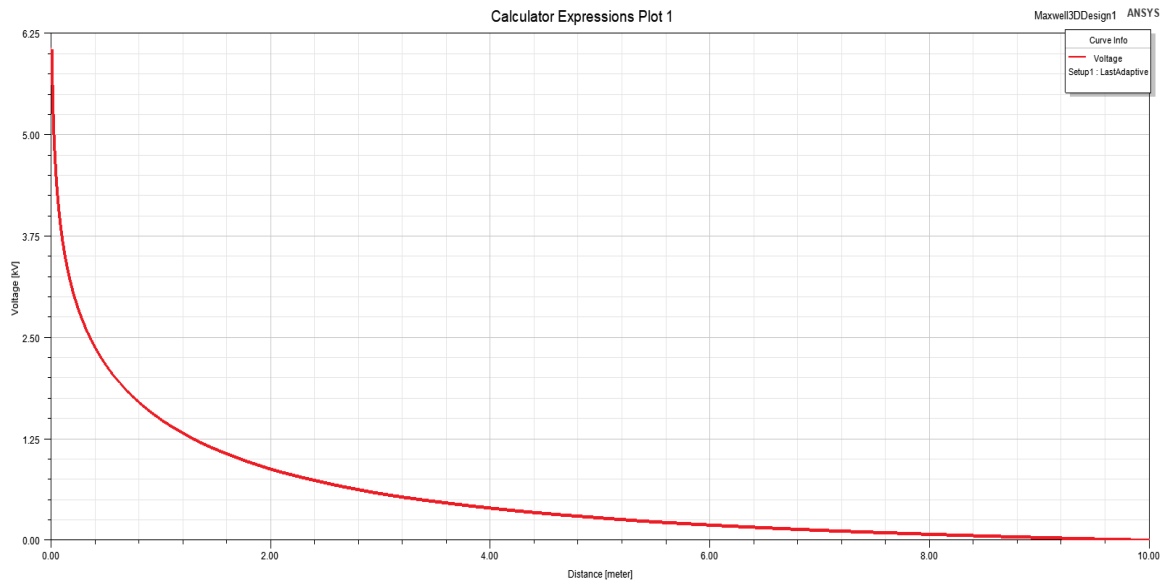
Slika 4.26. Raspodjela potencijala štapnog uzemljivača u dvoslojnom tlu, Maxwell



Slika 4.27. Detaljniji prikaz raspodjele potencijale oko uzemljivača u dvoslojnom tlu, Maxwell



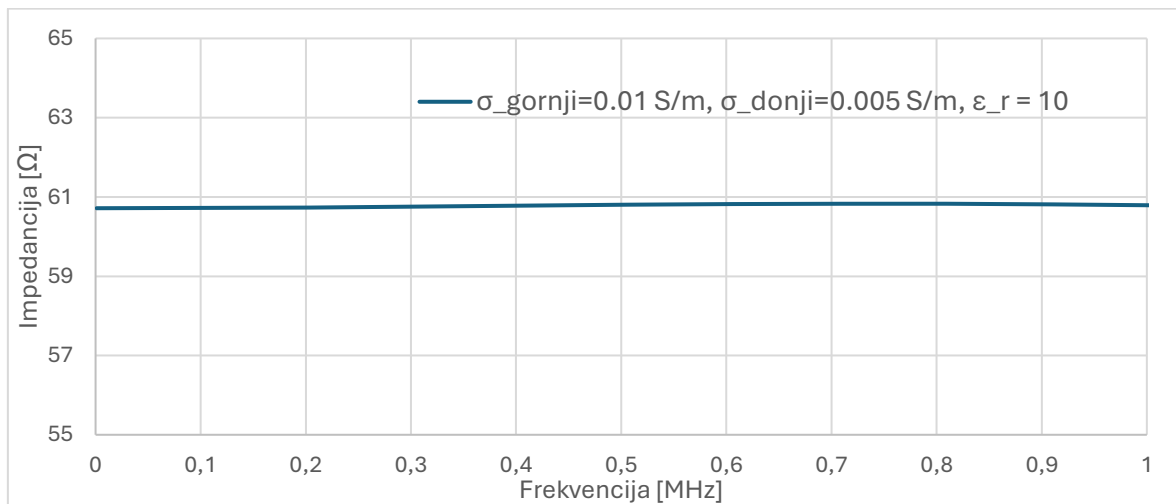
Slika 4.28. Gustoća struje u štapnom uzemljivaču u dvoslojnom tlu, Maxwell



Slika 4.29. Grafički prikaz promjene potencijala dvoslojnog tla udaljavanjem od šipke, Maxwell
 Odredit će se ponovno samo otpornost uzemljivačkog sustava iz Maxwellove simulacije.

$$R_{DC} = \frac{U_{max}}{I} = \frac{6043.2}{100} = 60.4\Omega$$

4.6. AC uzemljenje HFSS dvoslojno tlo

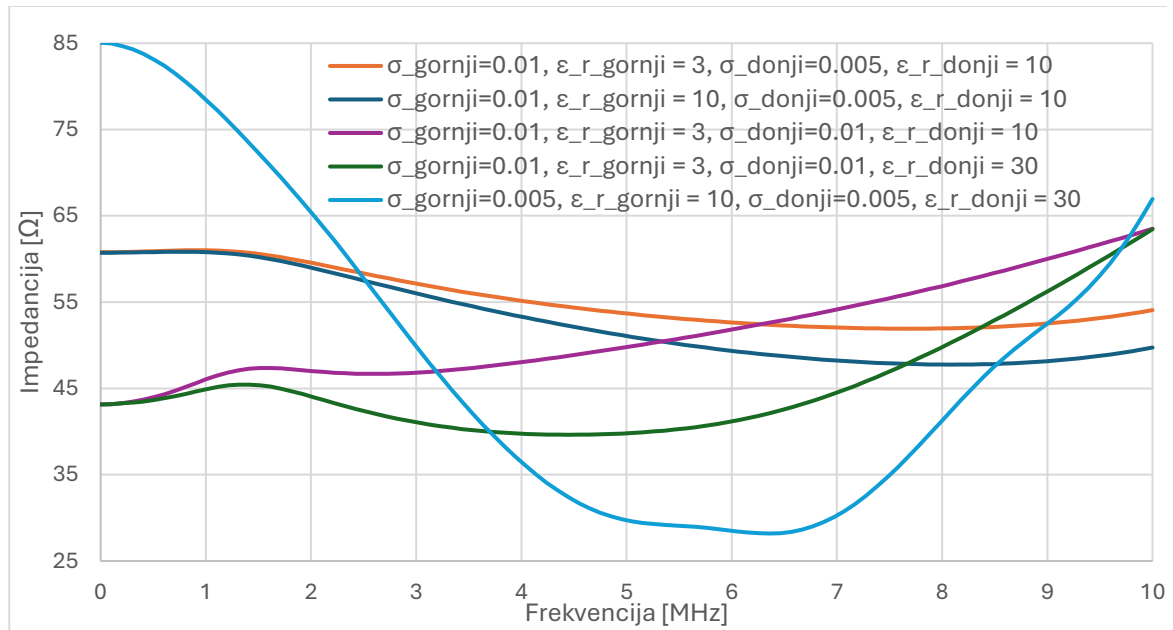


Slika 4.30. Impedancija dvoslojnog tla na niskim frekvencija za $\sigma_g=0.01$ S/m i $\sigma_d=0.005$ S/m

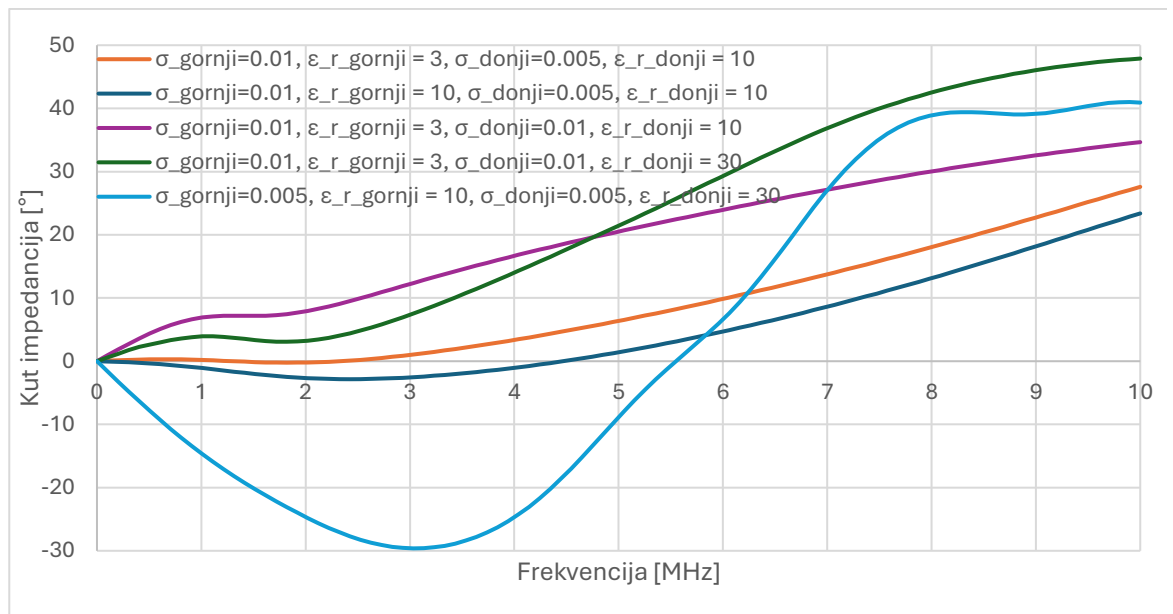
Postavljanjem vodljivosti slojeva jednakom kao u DC modelu i permitivnosti jednakom u oba sloja s iznosom od 10 prvo se radi validacija HFSS modela na niskim frekvencijama. Iz grafa na Slika 4.30. iščitava se vrijednost od 60.7Ω što je blisko vrijednostima dobivenim proračunima u ANSYS-u i Maxwellu od 60.8Ω , odnosno 60.4Ω . Time se zaključuje podudaranje vrijednosti i valjanost modela na niskim frekvencijama. U članku [8] nije

proučavano dvoslojno tlo tako da nema reference za validaciju impedancije na visokim frekvencijama.

Napravljeno je nekoliko proračuna s varijacijom parametara tla. Uzima se da niži slojevi imaju veću permeabilnost zbog veće količine vlage kako su gornji slojevi izloženi suncu.



(a)



(b)

Slika 4.31. Promjena (a) amplitude i (b) kuta impedancije s frekvencijom za frekventno ovisno dvoslojno tlo s različitim parametrima gornjeg i donjeg sloja

Analizu dobivenih proračuna najbolje je gledati u parovima. Kada se gledaju prva dva proračuna, na grafu označena narančastom i tamno plavom bojom, u kojima su zadane

vodljivosti kao u DC modelu za dvoslojno tlo tako da je gornji sloj dvostruko vodljiviji od donjeg dok se razlikuju u relativnoj permitivnosti gornjeg sloja. U prvom slučaju je ona manja od donjeg sloja i iznosi 3, dok je u drugoj jednaka onoj donjeg sloja od 10. Vidljivo je da oba proračuna imaju jednak NF otpor te kapacitivni karakter zbog male vodljivosti donjeg sloja koja dominira nad srednjom vodljivošću gornjeg sloja. Povećanjem permitivnosti gornjeg sloja kapacitivni karakter je izraženiji. Analizu se nastavlja idućim parom proračuna, ljubičasta i zelena linija, gdje slojevi imaju jednaku vodljivost od 0.01 S/m kao u jednoslojnom modelu te se razlikuju samo u permitivnosti donjeg sloja. Na NF vrijednosti impedancije poklapaju se s otporom u DC modelu dok rastom frekvencije trend je jednak onom u dvoslojnom, Slika 4.14. Povećanjem permitivnosti donjeg sloja induktivni karakter je početno manji dok kasnije ipak vodljivost daje izraženiji utjecaj i induktivnost poraste. Na kraju promatranog frekvencijskog područja impedancije su ponovno jednake. Ako se usporede prethodna dva para međusobno uočava se da iako tlo s različitim vodljivostima ima početno veću NF impedanciju zbog kapacitivnog karaktera, na VF ima manju impedanciju od tla veće vodljivosti. Prema tome homogenizacija tla radi jednostavnijeg modela i proračuna na VF frekvencijama unosi određenu nezanemarljivu pogrešku. Zadnji proračun prikazan svijetlo plavom bojom je za tlo jednake vodljivosti u oba sloja koja je jednaka vodljivosti donjeg sloja u prethodnim proračunima, 0.005 S/m. Permitivnost je veća u oba sloja od prethodno proučavanih. Takvo tlo ima izražen kapacitivni karakter što zbog manje vodljivosti što zbog veće permitivnosti. Iako početno ima primjetno veću NF impedanciju ona pada na vrijednost manju od svih ostalih tla, no daljnjim rastom frekvencije karakteristika postaje induktivna vjerojatno zbog srednje vodljivosti koja za šipku od 2 metra i dalje ima induktivno ponašanje.

Zaključak

Prilikom modeliranja uzemljivačkog sustava potrebno je poznavati točne parametre tla. Ponašanje uzemljivača na visokim frekvencijama ovisi o tim parametrima. Iako je visoko vodljivo tlo dobro za uzemljenje, na visokim frekvencijama poprima induktivni karakter te se impedancija povećava i pogoršava efikasnost. Isto tako duge šipke daju manji DC otpor, no s duljinom raste induktivni karakter na visokim frekvencijama. Što se tiče utjecaja permitivnosti izražena je kod tla većeg otpora te smanjuje impedanciju što znači da pridonosi kapacitivnoj karakteristici. Vodljivost i permitivnost su međuovisne i mijenjaju se s frekvencijom. Vodljivost s frekvencijom raste dok permitivnost pada. Ne uzimanjem te ovisnosti parametara nepotrebno se predimensionira sustav. Od uzročnika visokih frekvencija jedini problem je atmosfersko pražnjenje zbog svojeg širokog frekvencijskog spektra. Većina udara prema zemlji ima struju frekvencije ispod 10 MHz, dok je glavna amplituda na oko 400 do 500 kHz. U tom području dostignute su karakteristične frekvencije tla i prestaje čisto otporna karakteristika, a počinje induktivna ili kapacitivna.

Literatura

- [1] J. He, R. Zeng and B. Zhang, *Methodology and Technology for Power System Grounding*, Wiley-IEEE Press, 2012.
- [2] N. Holjevac, M. Zidar i I. Kuzle, »Mjerenje značajki uzemljivačkog sustava,« FER, Zagreb, 2020.
- [3] H. Požar, *Visokonaponska rasklopna postrojenja*, Zgreb: Tehnička knjiga, 1978.
- [4] W. Group, *IEEE 142 - Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems*, IEEE, 2007.
- [5] E. B. Joffe and K.-S. Lock, *Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook*, Piscataway: Wiley-IEEE Press, 2010.
- [6] M. A. Salam i Q. M. Rahman, *Power Systems Grounding*, Singapore: Springer, 2016.
- [7] »Wavenumber,« Wikipedia, 19 July 2024. [Mrežno]. Available: <https://en.wikipedia.org/wiki/Wavenumber>. [Pokušaj pristupa 29 8 2024].
- [8] B. Salarieh, J. D. Silva i B. Kordi, »High frequency response of grounding electrodes: effect of soil dielectric constant,« *IET Journals*, April 2020.
- [9] G. Vijayaraghavan, M. Brown i M. Barnes, *Practical Grounding, Bonding, Shielding and Surge Protection*, Oxford: Newnes, 2004.
- [10] S. Jurak, »FEM proračun otpora uzemljenja za uzemljivačku traku u kombinaciji sa štapnim uzemljivačima,« FER, Zagreb, 2023.
- [11] L. Grcev i M. Popov, »On High-Frequency Circuit Equivalents of a Vertical Ground Rod,« *IEEE Transactions on Power Delivery*, Volume 20, pp. 1598-1603, April 2005.
- [12] L. Grcev, »High-frequency grounding,« u *Lightnig-protection*, IET, 2009.

- [13] W. Chisholm, A. Haddad, H. Griffiths i J. Montana, Impact of soil-parameter frequency dependence on the response of grounding electrodes and on the lightning performance of electrical systems, Cigre, 2019.
- [14] A. R. d. Araújo, J. S. Colqui, C. M. d. Seixas, S. Kurokawa, B. Salarieh, J. P. Filho i B. Kordi, »Computation of ground potential rise and grounding impedance of simple arrangement of electrodes buried in frequency-dependent stratified soil,« *Electric Power Systems Research Volume 198*, September 2021.
- [15] C. Pereira, M. Guimarães i M. A. O. Schroeder, »Lightning Response of Grounding Grids: Simulated and Experimental Results,« *IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility*, November 2014.
- [16] T. L. T. d. Santos, R. M. S. d. Oliveira, C. L. d. S. S. Sobrinho i J. F. Almeida, »Soil Ionization in Different Types of Grounding Grids Simulated by FDTD Method,« u *2009 SBMO/IEEE MTT-S International Microwave and Optoelectronics Conference (IMOC)*, Belem, 2009.
- [17] J. He i B. Zhang, »Soil ionization phenomenon around grounding electrode under lightning impulse,« u *2013 Asia-Pacific Symposium on Electromagnetic Compatibility (APEMC)*, Melbourne, VIC, Australia, 2013.
- [18] Z. Popovic i B. Popovic, »The Skin Effect,« u *Introductory Electromagnetics*, Prentice Hall, 1999.
- [19] »What Is the Skin Effect?,« All About Circuits, [Mrežno]. Available: <https://www.allaboutcircuits.com/textbook/alternating-current/chpt-3/more-on-the-skin-effect/>. [Pokušaj pristupa 12. 2023.].
- [20] M. Delimar, Prijenos i razdjela električne energije, Zagreb: Fakultet elektrotehnike i računarstva, 2017.
- [21] J. He, R. Zeng i B. Zhang, »Fundamental Concepts,« u *Methodology and Technology for Power System Grounding*, IEEE, 2012.

- [22] J.-M. Bueno-Barrachina, S. Catalan-Izquierdo i C.-S. Cañas-Peñuelas, »Grounding system impedance characterization using FEM,« u *International Conference on Renewable Energies and Power Quality*, Las Palmas de Gran Canaria, 2011.
- [23] N. W. Damiano, L. Yan, B. Whisner i C. Zhou, »Simulation and Measurement of Through-the-Earth, Extremely Low-Frequency Signals Using Copper-Clad Steel Ground Rods,« *IEEE Transactions on Industry Applications*, Volume: 53, pp. 5088-5095, 11 May 2017.
- [24] M. Ghomi, H. R. Mohammadi, H. Karami, C. L. Bak, F. M. F. d. Silva i H. Khazraj, »Full-Wave Modeling of Grounding System: Evaluation The Effects of Multi-Layer Soil and Length of Electrode on Ground Potential Rise,« u *International Conference on Power Systems Transients*, Perpignan, 2019.
- [25] I. Uglešić, V. Milardić, B. Milešević i B. Filipović-Grčić, Tehnika visokog napona, Zagreb: FER, 2016.
- [26] M. Ghomi, »On The Frequency-Dependent Model of Grounding Systems for Power System Transient Analysis,« Aalborg Universitet, Aalborg, 2023.
- [27] S. Sharma, M. Ismail, P. Hittiarachhi, V. Cooray i F. Miranda, »Frequency spectra of various events pertinent to lightning cloud flashes obtained from wavelet transform technique and ratified by narrow band measurement technique,« *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, September 2021.
- [28] P. Hoole, S. Thirukumaran, H. Ramiah i J. Kanesan, »Ground-to-Cloud Lightning Flash Currents and Electric Fields: Interaction with Aircraft and Production of Ionosphere Sprites,« *Journal of Computational Engineering*, August 2014.
- [29] S. M. Ghania, »Grounding systems under lightning surges with soil ionization for high voltage substations by using two layer capacitors (TLC) model,« *Electric Power Systems Research*, Volume 174, September 2019.
- [30] M. R. Adzman i M. Lehtonen, »Fault Location in MV Unearthed Distribution Network Using the Undamped Frequency of the Transient Signal,« u *Mathematical Modelling and Simulation in Applied Sciences*, Otaakari, 2012.

[31] V. Esen, B. Oral i T. C. Akinci, »The determination of The determination of short circuits and grounding faults in electric power systems using time-frequency analysisshort circuits and grounding faults,« *Journal of Energy in Southern Africa*, May 2015.

[32] ANSYS, An Introduction to HFSS 2024R1, Canonsburg: ANSYS, Inc., 2024.

[33] ANSYS, Maxwell Help, Canonsburg: ANSYS Inc., 2019.

Sažetak

Frekventno ovisni 3D model jednostavne konfiguracije uzemljivača

Pojava atmosferskog pražnjenja u sustav unosi visoke frekvencije na kojima DC model uzemljenja više nije točan. Osim pojave impedancije u sustavu, odziv na frekvenciju popraćen je i promjenama u ponašanju uzemljivačkog vodiča te ponašanju tla. Kod tla to su promjena parametara tla s frekvencijom i ionizacija tla, a kod vodiča skin efekt, propagacijski efekti i struja pomaka. Napravljen je model u ANSYS HFSS programu na temelju članka čiji su rezultati poslužili za validaciju te je proučen utjecaj frekvencije na ponašanje jednostavne uzemljivačke šipke. Također izvršene su simulacije o utjecaju različitih parametara tla i dimenzija šipke na ponašanje impedancije sustava.

Ključne riječi: uzemljenje; HFSS; atmosfersko pražnjenje; impedancija; karakteristična frekvencija; permitivnost; električna vodljivost

Summary

Frequency-dependent 3D model of a simple grounding device configuration

The appearance of atmospheric discharge brings high frequencies into the system where the DC grounding model is no longer accurate. In addition to the appearance of impedance in the system, the frequency response is also connected with changes in the behaviour of the grounding conductor and the behaviour of the soil. In the case of soil, these are the change of soil parameters with frequency and soil ionization, and in the case of conductors there are skin effect, propagation effects and displacement current. A model was created in the ANSYS HFSS program based on an article whose results were used for validation. The influence of frequency on the behaviour of a simple grounding rod was studied. Simulations were also performed on the influence of different soil parameters and rod dimensions on the behaviour of the system impedance.

Keywords: grounding; HFSS; atmospheric discharge; impedance; characteristic frequency; permittivity; electrical conductivity

Skraćenice

GPR	<i>Ground Potential Rise</i>	porast potencijala na tlu
VF		visokofrekventno
NF		niskofrekventno
EM	<i>Electromagnetic</i>	elektromagnetsko
HFSS	<i>High Frequency Structure Simulator</i> frekvencije	simulator struktura za visoke
DC	<i>Direct Current</i>	istosmjerna struja
PML	<i>Perfectly matched layer</i>	savršeno usklađeni sloj