

DOI: [10.46793/CIGRE37.A3.02](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A3.02)

A3.02

**PRORAČUN TRANZIJENTNIH STRUJA U UZEMLJIVAČIMA KORIŠTENJEM
MODELA ZASNOVANIH NA TEORIJI ANTENA****CALCULATION OF TRANSIENT CURRENTS IN GROUNDING SYSTEMS USING
ANTENNA THEORY-BASED MODELS****Adnan Mujezinović *, Ajdin Alihodžić, Nedis Dautbašić, Maja Muftić Dedović**

Kratak sadržaj: U ovom radu predstavljen je matematički model za proračun raspodjele tranzijentnih struja u uzemljivačkim sistemima, zasnovan na teoriji antena. Modeliranje uzemljivača počiva na sistemu spregnutih integro-diferencijalnih jednačina tipa Pocklington, koje se primjenjuju na složene žičane strukture ukopane u poluprostor sa konačnom vodljivošću. Pocklingtonova jednačina izvedena je direktno iz Maxwellovih jednačina, a u radu je detaljno opisana kompletna procedura koja uključuje uticaj granice između dva medija, koristeći Fresnelove koeficijente refleksije. Sistem ovih jednačina riješen je primjenom indirektno metode graničnih elemenata, čime je određena raspodjela struje duž uzemljivača različitih geometrijskih oblika, što predstavlja osnovni parametar za analizu tranzijentnog odziva uzemljivačkih sistema.

Ključne riječi: uzemljivački sistemi, tranzijentne struje, teorija antena, granični elementi

Abstract: This paper presents a mathematical model for the calculation of transient current distribution in grounding systems, based on antenna theory. The modeling of grounding electrodes relies on a system of coupled integro-differential equations of the Pocklington type, applied to complex wire structures buried in a semi-space with finite conductivity. The Pocklington equation is derived directly from Maxwell's equations, and the paper thoroughly describes the entire procedure, including the influence of the boundary between two media using Fresnel reflection coefficients. The system of equations is solved using the indirect boundary element method, resulting in the determination of current distribution along grounding structures of various geometries, which represents a fundamental parameter for analyzing the transient response of grounding systems.

Keywords: grounding systems, transient currents, antenna theory, boundary elements

* Adnan Mujezinović, Univerzitet u Sarajevu – Elektrotehnički fakultet, Bosna i Hercegovina, adnan.mujezinovic@etf.unsa.ba

1 UVOD

Uzemljenje se definiše kao uspostavljanje vodljive veze između dijelova elektroenergetskih postrojenja i zemlje, koje se ostvaruje ukopavanjem metalnih vodiča različitih oblika i dimenzija u tlo te njihovim povezivanjem s relevantnim dijelovima postrojenja. Ključne komponente svakog sistema uzemljenja su uzemljivač – vodič (ili više njih) koji se polaže u zemlju i ostvaruje neposredan kontakt s njom – i zemljovod, koji omogućava vezu između dijelova postrojenja koje je potrebno uzemljiti i samog uzemljivača [1].

Tradicionalna analiza uzemljivačkih sistema usmjerena je na postizanje dva osnovna cilja: prvi je predstavljanje sistema putem njegovog ekvivalentnog električnog kruga pogodnog za opću analizu u uslovima poremećenih režima, a drugi se odnosi na određivanje napona u blizini površine zemlje, koji moraju biti u skladu s propisanim sigurnosnim standardima. U niskofrekventnim režimima, koji obuhvataju normalan rad i tipične kvarove, ekvivalentni model je jednostavan, a naponske razlike odgovaraju stvarnim potencijalima. Detaljan opis ponašanja uzemljivačkih sistema pri niskim frekvencijama obuhvaćen je važećim standardima [2].

Niska impedansa uzemljivačkog sistema predstavlja osnovni uslov za djelotvornu zaštitu od atmosferskih pražnjenja. Kao primjer se mogu navesti uzemljivači stubova visokonaponskih vodova i izoliranih vjetroelektrana, gdje je potrebno ostvariti otpor uzemljenja manji od $10\ \Omega$. Ovaj zahtjev je naročito izazovan u slučajevima tla s visokim specifičnim otporom, zbog čega je uspostava preciznog i efikasnog matematičkog modela od suštinske važnosti. Važno je napomenuti da se uzemljivački sistemi uobičajeno testiraju na veoma niskim frekvencijama, dok su atmosferska pražnjenja prirodne tranzijentne pojave s komponentama visokih frekvencija. Zbog toga je tranzijentna analiza uzemljivača od izuzetnog značaja kako sa teorijskog tako i sa praktičnog aspekta [3].

U slučaju direktnog udara atmosferskog pražnjenja u objekte, kroz sistem uzemljenja protiču struje vrlo visokih amplituda. Ove struje indukuju jaka elektromagnetna polja u vodičima sistema, koja generišu visoke napone tokom disipacije struje u tlu [4].

Pri projektovanju uzemljivača u visokonaponskim postrojenjima, potrebno je uzeti u obzir njihove impulsne karakteristike, odnosno odzive na brze elektromagnetne tranzijentne pojave. Impulsni odzivi uzemljivača na struje velikih amplituda značajno utiču na sigurnost i raspoloživost elektroenergetskih sistema, te zaslužuju posebnu pažnju. Ove pojave se javljaju najčešće pri direktnim udarima groma u elemente gromobranske zaštite ili usljed impulsa izazvanih sklopnim operacijama. Zbog pretežno induktivnog ponašanja uzemljivačkog sistema pri visokim frekvencijama, mogu se pojaviti znatni prenaponi koji negativno utiču na rad zaštitne, upravljačke i komunikacijske opreme. Interakcija između tranzijentnog stanja i uzemljivača je stoga od velike važnosti. Kompleksnost i široka rasprostranjenost modernih elektroenergetskih sistema zahtijevaju detaljnu analizu elektromagnetnih tranzijenata kako bi se obezbijedio siguran i pouzdan rad. Prilikom modeliranja neophodno je uvažiti i frekvencijsku ovisnost parametara komponenti. Elektromagnetne smetnje u niskonaponskim sekundarnim krugovima, uključujući mjerno-upravljačke sisteme elektrana, vjetroelektrana i baznih stanica mobilne telefonije, mogu biti ozbiljan izazov jer savremeni digitalni uređaji sadrže osjetljive elektroničke komponente [5].

Pristup koji tretira uzemljivački sistem kao ekvipotencijalnu strukturu primjenjiv je isključivo u stacionarnim uslovima [6].

Tokom tranzijentnih pojava uzemljivač ne ostaje na konstantnom potencijalu [7], što u praksi vodi do pojave potencijalnih razlika unutar sistema, izazvanih elektromagnetnom indukcijom. Te lokalne razlike mogu izazvati kvarove ili oštećenja električne i elektroničke opreme povezane na uzemljenje [6]. U stvarnim uslovima, ove razlike mogu biti dovoljno velike da ugroze bezbjednost ljudi u neposrednoj blizini [7].

U okviru tranzijentne analize, uzemljivački sistemi se mogu modelirati pomoću pojednostavljenih modela električnih krugova, modela zasnovanih na teoriji prijenosnih linija (TLM), ili modela utemeljenih na teoriji antena (AM). Iako su metode zasnovane na električnim krugovima jednostavne, one često ne pružaju dovoljnu tačnost. TLM modeli nude bolju aproksimaciju i brže računanje, ali su ograničeni u primjeni – posebno za vertikalne sonde i kompleksne mreže vodiča, pri čemu se često zanemaruje uticaj granice zemlja–zrak. Također, njihova tačnost je ograničena na određeni frekvencijski opseg, u zavisnosti od konfiguracije sistema i svojstava tla [8].

Najdetaljniji pristup analizi elektromagnetnih pojava u strukturama koje uključuju nadzemne i podzemne vodiče pruža model zasnovan na teoriji antena. Ovaj pristup koristi inverznu Fourierovu transformaciju (IFT) za određivanje tranzijentnog odziva, te omogućava efikasnu obradu zakrivljenih vodiča primjenom izoparametarskih elemenata – što je teško ostvarivo u okviru TLM pristupa. Međutim, glavni nedostatak ove metode jeste velika računaska složenost, posebno kod geometrijski kompleksnih uzemljivača [9].

Rigorozni elektromagnetski pristup, temeljen na teoriji antena, koristi sistem spregnutih integro-diferencijalnih jednačina Pocklingtonovog oblika za rješavanje problema u dvije različite sredine. Uticaj granice zemlja–zrak se tretira primjenom Sommerfeldovih integrala, uz korištenje aproksimacija kao što su modificirana teorija preslikavanja i refleksioni koeficijenti. Nedostatak ove formulacije je produženo vrijeme proračuna, naročito u širokom frekvencijskom opsegu [8]. Iz tog razloga, ovaj rad predstavlja model zasnovan na teoriji antena koji uključuje uticaj granice tlo–zrak korištenjem Fresnelovih koeficijenata refleksije.

2 MATEMATIČKI MODEL

Uzemljivački sistem razmatran rigoroznim elektromagnetskim modelom zasnovanim na teoriji antena predstavlja se odgovarajućom konfiguracijom žičanih antena. U skladu sa tankožičanom aproksimacijom, osobine ovakvih konfiguracija su dominantno određene raspodjelom aksijalnih struja po žicama. Struje po vodičima složenog uzemljivačkog sistema određene su serijom spregnutih integro-diferencijalnih jednačbi Pocklington-ovog oblika za žice proizvoljnog oblika [10].

Sistem Pocklington-ovih jednačbi se može izvesti direktno iz Maxwell-ovih jednačbi, uz minimalne aproksimacije, tako što se električno polje izrazi preko magnetskog vektorskog potencijala i skalarnog električnog potencijala, te primjenom Lorentz-ovog baždarnog uslova, kojim je data veza između njih. Također, moraju biti osigurani uslovi za nesmetan prolaz tangencijalnih komponenti električnog polja na površini vodiča [11].

Problemi elektromagnetskog raspršenja mogu se analizirati direktnim rješavanjem Maxwell-ovih jednačbi. Međutim, Maxwell-ove jednačbe su spregnute prostorno-vremenski ovisne parcijalne diferencijalne jednačbe prvog reda koje je veoma teško primijeniti na rješavanje problema graničnih vrijednosti. Jedan od standardnih načina prevazilaženja tih poteškoća je rješavanje elektromagnetskih valnih jednačbi za harmonijski ovisne probleme. Za idealno vodljivu žicu ukupno polje na površini žice iščezava, pa vrijedi [8]:

$$\vec{s} \cdot (\vec{E}^{pob} - \vec{E}^{ras}) = 0 \quad (1)$$

gdje je $\vec{s}$ jedinični vektor tangente u tački promatranja na površini žice, $\vec{E}^{pob}$ pobudna komponenta vektora električnog polja i $\vec{E}^{ras}$ raspršna komponenta vektora električnog polja. Koristeći prvu Maxwellovu jednadžbu za harmonijski promjenjiva električna i magnetska polja može se pisati [12]:

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (2)$$

gdje je ∇ operator Nabla, ω kružna frekvencija a $\vec{B}$ vektor magnetske indukcije.

Lorentz-ovo baždarenje, koje daje vezu između vektorskog magnetskog i skalarnog električnog potencijala i predstavlja praktično najznačajniju aproksimaciju antenskog modela, moguće je pisati u obliku [9]:

$$\nabla \vec{A} + j\omega\mu\epsilon_{eff}\vec{\phi} = 0 \quad (3)$$

gdje je $\vec{A}$ vektorski magnetski potencijal, μ predstavlja permeabilnost medija, ϕ predstavlja skalarni električni potencijal, a ϵ_{eff} predstavlja kompleksnu permitivnost medija i može se izraziti pomoću sljedeće jednadžbe [10]:

$$\epsilon_{eff} = \epsilon_0\epsilon_r - j\frac{\sigma}{\omega} \quad (4)$$

U prethodnoj jednadžbi ϵ_0 predstavlja specifičnu permitivnost vakuma, ϵ_r predstavlja relativnu permitivnost medija, a σ specifičnu električnu vodljivost medija.

Uvrštavanjem izraza (3) u izraz (2), raspršno električno polje može se izraziti isključivo primjenom magnetskog vektorskog potencijala pomoću sljedeće jednadžbe [13]:

$$\vec{E}^{ras} = -j\omega\vec{A} + \frac{1}{j\omega\mu\epsilon_{eff}}\nabla(\nabla\vec{A}) \quad (5)$$

Magnetski vektorski potencijal definiran je partikularnim integralom [14]:

$$\vec{A}(s) = \frac{\mu}{4\pi} \int_C I(s') g(s, s', s^*) \vec{s}' ds' \quad (6)$$

gdje je $I(s')$ inducirana struja duž žice, a $g(s, s', s^*)$ odgovarajuća Green-ova funkcija koja ima sljedeći oblik [8]:

$$g(s, s', s^*) = \frac{e^{j\gamma R_1}}{R_1} - \Gamma_{ref} \frac{e^{j\gamma R_2}}{R_2} \quad (7)$$

U Green-ovoj funkciji R_1 i R_2 predstavljaju udaljenosti između tačke izvora i tačke promatranja i odslikane tačke izvora i tačke promatranja, respektivno. Simbol γ predstavlja propagacijsku konstantu koja se računa pomoću sljedeće jednačbe [10]:

$$\gamma = \omega \sqrt{\mu_0 \epsilon_{eff}} \quad (8)$$

Prisustvo granice tlo-zrak uzet je u obzir preko Fresnelovog refleksionog koeficijenta [15]:

$$\Gamma_{ref} = \frac{\frac{1}{\underline{n}} \cos \theta - \sqrt{\frac{1}{\underline{n}} - \sin^2 \theta}}{\frac{1}{\underline{n}} \cos \theta + \sqrt{\frac{1}{\underline{n}} - \sin^2 \theta}} \quad \theta = \arctg \frac{|x - x'|}{2d} \quad \underline{n} = \frac{\epsilon_{eff}}{\epsilon_0} \quad (9)$$

Provođenjem odgovarajućih matematičkih manipulacija i kombiniranjem prethodnih jednačbi dolazi se do Pocklingtonove integro-diferencijalne jednačbe za nepoznatu raspodjelu struje duž tanke žice proizvoljnog oblika ukopane u medij s gubicima [16]:

$$\begin{aligned} \vec{E}^{pob} = & -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \int_{C'} I(s') \cdot \vec{s} \cdot \vec{s'} \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial s \partial s'} - \gamma^2 \right) g_0(s, s') ds' \\ & + \Gamma_{ref} \int_{C'} I(s') \cdot \vec{s} \cdot \vec{s^*} \cdot \left(\frac{\partial^2}{\partial s \partial s^*} - \gamma^2 \right) g_0(s, s^*) ds^* \end{aligned} \quad (10)$$

Budući da su uzemljivački sistemi pobuđeni strujnim izvorom, za njih vrijedi sljedeći uvjet [17]:

$$\vec{E}^{pob}(s) = 0 \quad (11)$$

Kombiniranjem jednačbi (10) i (11) može se pisati [10]:

$$0 = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \sum_{n=1}^M \left[\int_{C'} I_n(s'_n) \cdot \vec{s}_n \cdot \vec{s'_n} \cdot \left[\frac{\partial^2}{\partial s_m \partial s'_n} - \gamma^2 \right] g_{o,nm}(s_m, s'_n) ds'_n + \right. \\ \left. + \Gamma_{ref} \int_{C'} I_n(s'_n) \cdot \vec{s}_m \cdot \vec{s_n^*} \cdot \left[\frac{\partial^2}{\partial s_m \partial s_n^*} - \gamma^2 \right] g_{i,nm}(s_m, s_n^*) ds'_n \right], m = 1, 2, \dots, M \quad (12)$$

3 PROCEDURA PRORAČUNA POKLINGTONOVE JEDNAČBE

Numeričko rješavanje Pocklington-ove integro-diferencijalne jednačbe može se provesti primjenom različitih metoda i postupaka. U najvećem broju slučajeva integralne i integro-diferencijalne jednačbe proizašle iz problema elektrostatike se tretiraju primjenom neke od varijanti metode graničnih elemenata pri čemu se dobivaju tzv. jake formulacije. Međutim, u okviru jake formulacije javljaju se određeni problemi, među kojima i kvazisingularnost jezgre, tj. Green-ove funkcije, budući da se deriviranje jezgre obavlja analitički, što nužno dovodi do kvazisingularnosti.

Sa druge strane, ako se pak deriviranje jezgre obavlja pomoću metode konačnih diferencija, javljaju se neželjene pojave u vidu sporije konvergencije i nesimetričnosti matrice u numeričkom rješavanju. Pobrojani nedostaci su otklonjeni primjenom tzv. nejake formulacije metode graničnih elemenata, koja je poznata kao Galerkin-Bubnov šema indirektno metode graničnih elemenata. Kod ove formulacije se, uz izbor istih baznih i testnih funkcija, dobijaju identične krajnje relacije onima kod varijacijskog pristupa. Naime, podesnom primjenom parcijalne integracije i integralnih teorema vektorske analize naknadno se snizi red derivacija u diferencijalnoj jednadžbi [15].

Rješavanje jednadžbe (12) primjenom metoda graničnih elemenata počinje od toga da se izvrši primjena lokalne aproksimacije za nepoznatu struju duž segmenta žice, odnosno da se nepoznata struja po segmentu n -te žice izrazi u vidu konačne sume linearno neovisnih funkcija oblika i nepoznatih kompleksnih koeficijenata, kako slijedi [18]:

$$I_n^e(s') = \sum_{i=1}^n I_{ni} f_{ni}(s') = \{f\}_n^T \{I\}_n \quad (13)$$

Primjenom metode graničnih elemenata može se pisati sljedeći matrični sistem [19]:

$$\sum_{n=1}^{N_w} \sum_{i=1}^{N_g} [Z]_{mn}^{ji} \{I\}_{ni} = 0, \quad m = 1, 2, \dots, N_w \quad (14)$$

gdje je N_w ukupan broj žica, N_g ukupan broj elemenata na n -toj žici.

Matrica $[Z]_{mn}^{ji}$ fizikalno predstavlja matricu međusobne impedanse za j -ti granični element promatranja na m -toj žici i i -ti granični element izvora na n -toj žici, a vektor $\{I\}_{ni}$ predstavlja vektor rješenja u globalnim čvorovima [15].

Matrica $[Z]_{mn}^{ji}$ data je izrazom [16]:

$$[Z]_{mn}^{ji} = -\frac{1}{j4\pi\omega\epsilon_{eff}} \left[\begin{aligned} & \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \{D\}_j \{D\}_i^T g_{o,nm}(s_m, s_n') ds_n' ds_m \\ & + k_1^2 \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \vec{s}_n \cdot \vec{s}_n' \{f\}_j \{f\}_i^T g_{o,nm}(s_m, s_n') ds_n' ds_m \\ & - \Gamma_{ref} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \{D\}_j \{D\}_i^T g_{i,nm}(s_m, s_n^*) ds_n' ds_m^* \\ & + \Gamma_{ref} \int_{-1}^1 \int_{-1}^1 \vec{s}_n \cdot \vec{s}_n^* \{f\}_j \{f\}_i^T g_{i,nm}(s_m, s_n^*) ds_n' ds_m^* \end{aligned} \right] \quad (15)$$

Globalni matrični sistem se može napisati u obliku [20]:

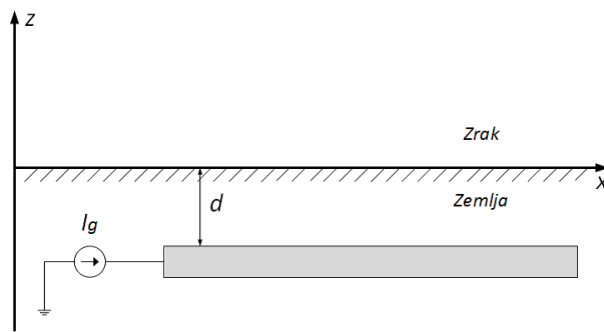
$$\begin{bmatrix} Z_{22} & Z_{23} & \dots & Z_{2K} \\ Z_{32} & Z_{33} & \dots & Z_{3K} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ Z_{K2} & Z_{K3} & \dots & Z_{KK} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} I_2 \\ I_3 \\ \vdots \\ I_K \end{Bmatrix} = -I_g \begin{Bmatrix} Z_{21} \\ Z_{31} \\ \vdots \\ Z_{K1} \end{Bmatrix} \quad (16)$$

Rješavanjem prethodnog matričnog sistema dobija se raspodjela struje na vodičima uzemljivačkog sistema.

4 PRIMJERI PRORAČUNA

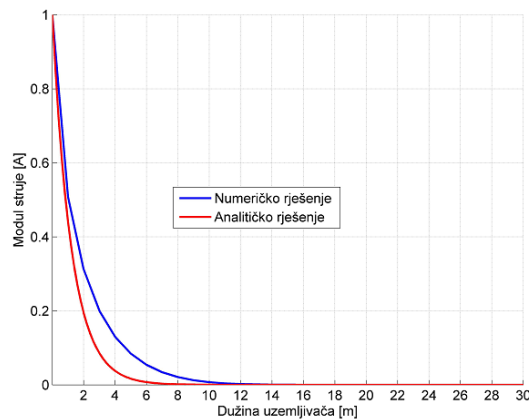
4.1 Horizontalni uzemljivač

Osnovni element svih uzemljivačkih sistema je horizontalni uzemljivač, te je proračun struje po njemu odlična polazna tačka za provjeru karakteristika razvijenog računarskog programa. Analizira se horizontalni uzemljivač dužine $L = 30$ m, ukopan na dubinu $d = 0.5$ m, kao što je prikazano na Slici 1. Radijus vodiča je $a = 0.02$ m, specifična električna otpornost tla $\rho = 100$ Ω m, relativna permitivnost tla $\epsilon_r = 10$, a relativna permeabilnost $\mu_r = 1$. Frekvencija je $f = 10$ MHz.



Slika 1: Horizontalni uzemljivač ukopan u tlo na dubini d

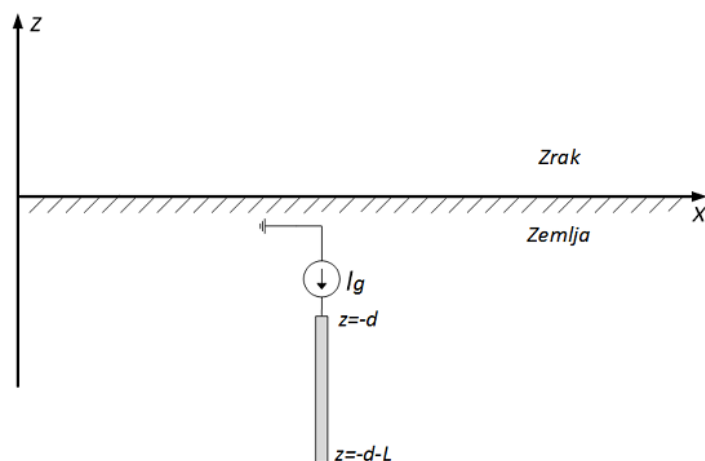
Na Slici 2 prikazana je raspodjela struje po analiziranom uzemljivaču dobijena analitičkim i numeričkim proračunom. Razlika koja se pojavljuje između proračunatih vrijednosti struja u odgovarajućim tačkama, prvenstveno je posljedica činjenice da je kod rješavanja analitičkim putem zanemaren uticaj granice između zemlje i zraka.



Slika 2: Raspodjela struje po horizontalnom uzemljivaču dužine 30 m

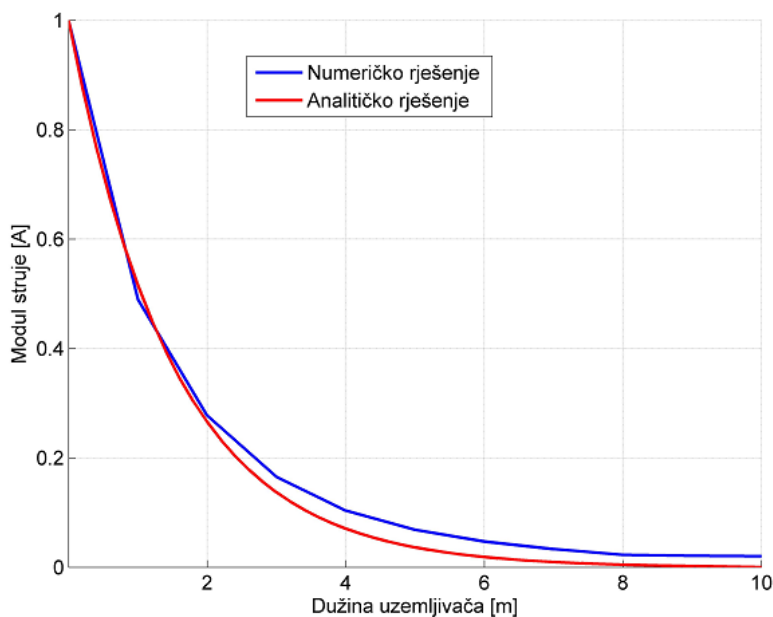
4.2 Vertikalni uzemljivač

U situacijama kada se ima tlo visoke vrijednosti specifične električne otpornosti ρ upotreba samo horizontalnih uzemljivača ne daje zadovoljavajuće rezultate, te je u takvim situacijama nužna upotreba i vertikalnih uzemljivačkih sondi. Za ovaj proračun pretpostavljeno je da se ima tlo za koje je specifična električna otpornost $\rho = 5000 \Omega\text{m}$, kako bi se što vjernije simulirali realni uslovi ugradnje ovakvog uzemljivača. Razmotren je uzemljivač dužine $L = 10 \text{ m}$, zaboden na dubine od $d = 0.5 \text{ m}$ do $d = 10.5 \text{ m}$, kao što je prikazano na Slici 3. Ostali parametri proračuna su nepromijenjeni u odnosu na prvi razmotreni primjer.



Slika 3: Analizirani vertikalni uzemljivač

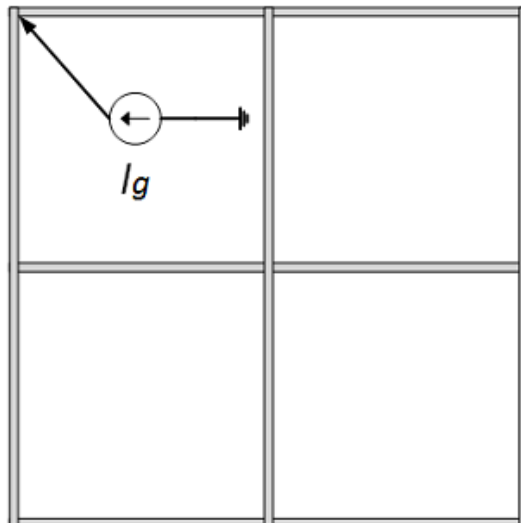
Raspodjela struje duž analizirane vertikalne uzemljivačke sonde prikazana je na Slici 4. Interesantno je uočiti bolje slaganje rezultata analitičkog i numeričkog proračuna nego u slučaju horizontalnog uzemljivača, što se može objasniti manjim uticajem granice zemlja-zrak zbog većih dubina na kojima se nalaze ovakvi uzemljivači.



Slika 4: Raspodjela struje po vertikalnom uzemljivaču

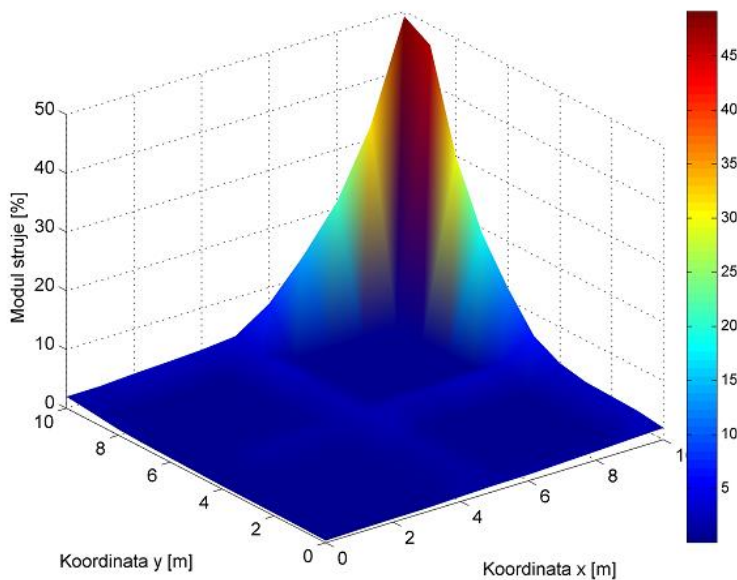
4.3 Uzemljivačka mreža

U nastavku je analizirana pojednostavljena uzemljivačka mreža prikazana na Slici 5. Analizirana je mreža dimenzija 10x10 m sa četiri okna dimenzija 5x5 m, položena na dubini $d = 0.5$ m u tlo sa $\rho = 1000 \Omega\text{m}$.



Slika 5: Analizirana uzemljivačka mreža.

Rezultati proračuna raspodjele struje po vodičima uzemljivača prikazani su na slici 6.



Slika 6: Raspodjela struje po uzemljivačkoj mreži

Iz prikazanih rezultata je uočljivo da je raspodjela struja po segmentima uzemljivača blaža u slučaju uzemljivačke mreže u odnosu na primjere vertikalnog i horizontalnog uzemljivača. Ovakva pojava se može objasniti efektima grananja struje u tački injektiranja u prethodnom primjeru.

5 ZAKLJUČAK

Projektovanje i implementacija uzemljivačkog sistema predstavljaju ključni segment u izgradnji elektroenergetskih objekata, jer funkcionalan sistem uzemljenja čini osnovu sigurnog rada elektroenergetskog sistema, kako u normalnim, tako i u poremećenim radnim uslovima. Uzemljenje podrazumijeva uspostavljanje vodljive veze između pojedinih dijelova elektroenergetskih postrojenja i tla, što se realizuje ukopavanjem metalnih vodiča različitih geometrijskih karakteristika u zemlju i njihovim povezivanjem s relevantnim dijelovima postrojenja. Primarna svrha uzemljivačkih sistema je zaštita ljudskih života unutar i izvan postrojenja, kao i očuvanje pravilnog funkcionisanja uređaja i instalacija koje su na njih povezane. Ovisno o svojoj funkciji, uzemljivački sistemi se dijele na četiri osnovne kategorije: radno (pogonsko), zaštitno, gromobransko i združeno uzemljenje.

Tradicionalna analiza ovih sistema fokusira se na stacionarna stanja pri standardnim (industrijskim) frekvencijama. Ipak, u uslovima poremećenih režima rada, gdje dolazi do pojave visokofrekventnih napona i struja, modeli razvijeni za niskofrekventna stanja postaju nedovoljni. Na primjer, dok se pri industrijskoj frekvenciji uzemljivač može smatrati ekvipotencijalnom strukturom, tokom tranzijentnih procesa mogu nastati znatne potencijalne razlike unutar samog uzemljivača, što ozbiljno ugrožava sigurnost ljudi i opreme. Kako bi se minimizirao rizik ovakvih pojava, neophodno je sprovesti analize elektromagnetske kompatibilnosti, s ciljem boljeg razumijevanja ponašanja uzemljivačkog sistema i eventualnog prilagođavanja njegove konstrukcije.

6 LITERATURA

- [1] A. Muharemović i V. Boras: Električne instalacije i mjere sigurnosti, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, Sarajevo, 2009. F. Majdandžić, „Uzemljivači i sustavi uzemljenja“, Graphis, Zagreb, 2004.
- [2] F. Majdandžić, „Uzemljivači i sustavi uzemljenja“, Graphis, Zagreb, 2004.
- [3] D. Poljak, S. Sesnic, and R. Goic: Analytical versus boundary element modelling of horizontal ground electrode, Engineering analysis with boundary elements, vol. 34, no. 4, pp. 307–314, 2010.
- [4] L. Grčev, V. Arnautovski-Toševa, „Grounding Systems Modeling for High Frequencies and Transients: Some Fundamental Considerations“, IEEE Bologna PowerTech Conference, 2003.
- [5] S. Sadović i R. Gačanović: Impulsne karakteristike uzemljivača, Elektrotehnički fakultet u Sarajevu, 2008.
- [6] L. D. Grcev, Computer analysis of transient voltages in large grounding systems, IEEE Transactions on power delivery, vol. 11, no. 2, pp. 815–823, 1996.
- [7] R. G. Olsen and L. Grcev: Analysis of high-frequency grounds - Comparison of theory and experiment, IEEE Transactions on Industry Applications, vol. 51, no. 6, pp. 4889–4899, 2015.

- [8] D. Poljak: Teorija električnih polja sa primjenama u inženjerstvu, Školska knjiga, Zagreb, 2014.
- [9] D. Poljak, V. Doric, and D. Cavka: On the use of isoparametric elements for bem modeling of arbitrarily shaped thin wires in electromagnetic compatibility applications,” WIT Transactions on Modelling and Simulation, vol. 53, pp. 297– 306, 2012.
- [10] D. Poljak, Advanced Modeling in Computational Electromagnetic Compatibility, NJ, USA: Wiley-Interscience, 2007.
- [11] D. Čavka, „Napredno numeričko modeliranje složenih tankožičanih struktura u elektromagnetizmu“, Doktorska disertacija, Split, 2011
- [12] L. Grčev, F. Dawalibi, „An electromagnetic model for transients in grounding systems“, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5. No. 4. November 1990.
- [13] D. Poljak, S. Šesnić, K. El-Khamlichi Drissi, K. Kerroum, S. Tkachenko, „Transient Electromagnetic Field Coupling to Buried Thin Wire Configurations: Antenna Model versus Transmission Line Approach in the Time Domain“, International Journal of Antennas and Propagation, Article ID 3943754, 2016.
- [14] S. Šesnić, D. Poljak, S. Tkachenko, „Analytical Modeling of a Transient Current Flowing Along the Horizontal Grounding Electrode“, IEEE Transactions on Electromagnetic Compatibility, 2013.
- [15] E. K. Miller, A. J. Poggio, G. J. Burke: An integro-differential equation technique for the time-domain analysis of thin wire structures. I The numerical method, J. of Computational Phys. 12, 24-48, 1973.
- [16] D. Poljak, D. Čerdić, V. Dorić, A. Peratta, V. Roje & C. A. Brebbia, Boundary element modelling of complex grounding systems: study on current distribution, WIT Transactions on Modelling and Simulation, Vol 50, pp. 123–132, 2010.
- [17] L. D. Grcev, F. E. Menter: Transient Electro - magnetic Fields Near Large Earthing Systems, IEEE Trans. Magnetics, vol. 32, pp. 1525-1528, May 1996.
- [18] S. Sesnic, D. Poljak, G. Knezic: Influence of the soil ionization on the transient current induced along the horizontal grounding electrode, Software, Telecommunications and Computer Networks (SoftCOM), 2015 23rd International Conference on, pp. 64-68, IEEE, 2015.
- [19] D. Poljak, V. Roje, „Boundary-element approach to calculation of wire antenna parameters in the presence of dissipative halfspace“, IEE Proc-Microw. Antennas Propag.. Vol. 142. No. 6, December 1995
- [20] S. Šesnić, D. Poljak, „Antenna model of the horizontal grounding electrode for transient impedance calculation: Analytical versus boundary element method“, Engineering Analysis with Boundary Elements 37(2013) 909–913, 2013.