

# Modelovanje složenih uzemljivača pomoću C# aplikacije

Milan Ivezić, Milan Jović, Borko Čupić

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet  
Beograd, Srbija

Visoka škola elektrotehnike i računarstva  
Beograd, Srbija

milan.ivezic@viser.edu.rs, milan.jovic@viser.edu.rs,  
borko.cupic@viser.edu.rs

Aleksandar Jovanović

Beograd, Srbija  
alex.jovanovic1983@gmail.com

**Sadržaj**—U radu je opisan postupak modelovanja složenih uzemljivačkih sistema proizvoljne geometrije pomoću posebno razvijene aplikacije u C#. Aplikacija na osnovu geometrije uzemljivača preuzete iz njegovog AutoCAD modela, kao i podataka o struji jednofaznog kratkog spoja i specifičnoj otpornosti tla izračunava otpornost raspoređivanja uzemljivača, potencijal tačaka na površini tla iznad uzemljivača, kao i napon dodira i napon koraka u tim tačkama. Rezultati su prikazani grafički kroz 2D i 3D dijagrame.

**Ključne riječi**- uzemljivač, otpornost uzemljenja, potencijal tla, napon dodira, napon koraka, AutoCAD, C# aplikacija

## I. UVOD

Razvoj savremenih elektroenergetskih sistema u pravcu korišćenja sve viših naponskih nivoa, povećanja snaga kao i razdaljina u prenosu električne energije zahtjeva sve strožije uslove u pogledu sigurnosti, stabilnosti, pouzdanosti i ekonomičnosti. Jedan od najbitnijih elemenata elektroenergetskog sistema od kojih ti uslovi zavise je sistem uzemljenja [1].

Sa jedne strane, od sistema uzemljenja zavisi visina unutrašnjih prenapona koji se javljaju kao posljedica poremećaja u mreži, pa sistem uzemljenja direktno utiče na dimenzionisanje izolacije opreme, što za najviše naponske nivoe znatno povećava investiciona ulaganja. Od sistema uzemljenja takođe zavise i struje zemljospojeva, koje mogu da stvarati teškoće u pogledu pojave opasnosti od električnog udara, naročito u mrežama nižeg naponskog nivoa gdje je elektroenergetska mreža u bliskom kontaktu sa telekomunikacionim instalacijama, instalacijama vodovoda, toplovoda, armirano-betonskim i drugim elektroprovodnim elementima koji su u normalnom pogonu na neutralnom potencijalu [2].

Posebno važna uloga sistema uzemljenja je da spriječi pojavu opasnih napona dodira i napona koraka koji se javljaju kao posljedica kako odvođenja struja kvarova koje imaju industrijsku učestanost, tako i udarnih struja koje uzrokovanih atmosferskim pražnjenjem. Ograničenje tih napona na prihvatljivu mjeru je krucijalna mjera u postizanju bezbjednosti jer direktno utiče na živote i zdravlje ljudi koji borave u

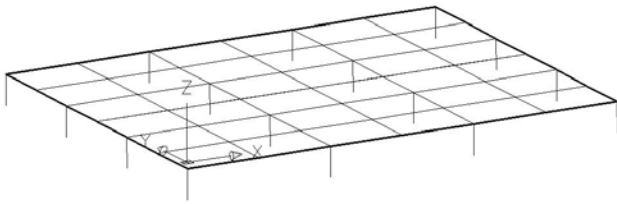
elektroenergetskim postrojenjima ili u okolini uzemljivača sa kog se odvodi struja.

Sve veća potreba za električnom energijom nužno dovodi do povećanja snaga u elektroenergetskom sistemu, a samim tim i do povećanja struja kratkih spojeva. Iz toga razloga treba obezbijediti da otpornost uzemljenja bude dovoljno mala kako bezbjednost ne bi bila ugrožena. Međutim, često to nije lako ostvariti, pogotovo kada su u pitanju elektroenergetska postrojenja u gradskim područjima gdje je prostor za postavljanje uzemljivača ograničen, a zemljište u kome uzemljivač treba da bude izveden neadekvatne specifične otpornosti.

Da bi se olakšao proces projektovanja uzemljivača, razvijena je C# aplikacija koja pravi električni model uzemljivača na osnovu njegove geometrije i uz podatke o struji zemljospoja i tlu u kojem uzemljivač treba da bude postavljen, daje izlazne rezultate u vidu otpornosti raspoređivanja uzemljivača, potencijala tačaka na tlu iznad uzemljivača, kao i napona dodira i napona koraka. Aplikacija ulazne podatke o geometriji uzemljivača uzima iz AutoCAD modela uzemljivača. To je pogodno iz razloga što je u inženjerskoj praksi AutoCAD opšteprihvaćen alat za grafički dizajn i omogućava jednostavnu izradu nacрта i njihovu eventualnu naknadnu korekciju. Za korišćenje u aplikaciji, trodimenzionalni AutoCAD model uzemljivača treba biti sačuvan u DXF formatu (eng. *Drawing Interchange Format*). Svaka od grana uzemljivača treba biti predstavljena jednom linijom čija debljina označava prečnik grane tako što debljina linije u milimetrima u AutoCAD-u predstavlja prečnik grane u decimetrima. X-Y ravan u AutoCAD modelu predstavlja ravan površine tla, a apsolutna vrijednost Z koordinate dubinu ukopavanja. Usvojeno je da jedna AutoCAD jedinica predstavlja dužinu od jednog centimetra. Uzemljivač može imati proizvoljnu geometriju i ne postoji ograničenje u pogledu broja elemenata od kojih se sastoji i njihovog međusobnog položaja.

U radu je analiziran uzemljivač elektroenergetskog postrojenja izveden u vidu horizontalne mreže provodnika ukopanih na dubini od 80 cm i vertikalnih provodnika (sondi) dužine 4 m. Ukupna dužina uzemljivača je 60 m, a širina 48 m i sva okca su jednaka. Provodnici koji čine spoljašnju konturu

uzemljivača imaju prečnik 3 cm, a ostali provodnici 2 cm. Izgled analiziranog uzemljivača je prikazan na Sl. 1.



Slika 1. Izgled analiziranog uzemljivača

Postupak korišćen u radu podrazumijeva da je uzemljivač izveden od međusobno galvanski spojenih metalnih elemenata kružnog poprečnog presjeka, položenih u homogenom tlu, tj tlu kontantne specifične otpornosti.

Učitavanjem odgovarajuće DXF datoteke koja predstavlja AutoCAD model uzemljivača, aplikacija ima podatke o svim elementima uzemljivača, njihovom međusobnom položaju i položaju u odnosu na ravan površine tla.

## II. FORMIRANJE ELEKTRIČNOG MODELA UZEMLJIVAČA

Osnovni parametar električnog modela uzemljivača je otpor rasprostiranja koji predstavlja otpor kojim se tlo suprotstavlja odvođenju struje sa uzemljivača i ima prorođu aktivne otpornosti. [3][4]. Otpor rasprostiranja isključivo zavisi od konstruktivnih parametara uzemljivača i parametara tla. Osim karakteristika pojedinačnih elemenata uzemljivača, otpor rasprostiranja zavisi i od njihovog međusobnog položaja i specifične otpornosti tla, a ta zavisnost je predstavljena kroz matricu sopstvenih i međusobnih otpornosti grana uzemljivača  $R$ . To je kvadratna matrica čija je dimenzija jednaka broju grana uzemljivača, a na glavnoj dijagonali joj se nalaze sopstvene otpornosti, a izvan glavne dijagonale međusobne otpornosti grana uzemljivača. Sopstvene otpornosti su određene sljedećom relacijom: [3]

$$r_s = \frac{\rho}{2\pi L} \cdot \ln \frac{2L}{d} \quad (1)$$

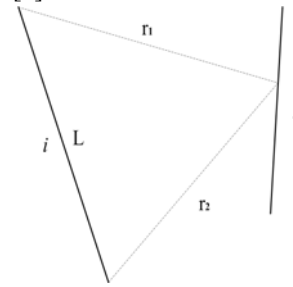
gdje je:  $L$  dužina, a  $d$  prečnik grane uzemljivača.

Metoda za određivanje međusobne otpornosti  $i$ -te i  $j$ -te grane uzemljivača, čiji je međusobni položaj ilustrovan na Sl. 3; je zasnovana na relaciji za međusobnu otpornost pravolinijske cijevi kružnog poprečnog presjeka proizvoljne tačke u homogenom tlu u okolini te cijevi, u skladu sa Sl. 2: [1]

$$r_m = \frac{\rho}{4\pi L} \cdot \ln \frac{r_1 + r_2 + L}{r_1 + r_2 - L} \quad (2)$$

Sušтина metode je da se  $j$ -ta grana uzemljivača izdijeli na male pravolinijske segmente i da se međusobna otpornost  $i$ -te grane prema  $j$ -toj izračunava kao srednja vrijednost otpornosti

$i$ -te grane prema pojedinačnim segmentima na koje je podijeljena  $j$ -ta grana. Matricom sopstvenih i međusobnih otpornosti uzemljivača je određen i njegov otpor rasprostiranja  $R_u$  prema relaciji: [3]



Slika 2. Ilustracija međusobnog položaja dvije grane uzemljivača

$$R_u = \frac{1}{[1]^T [R]^{-1} [1]} \quad (3)$$

Napon uzemljivača  $U_u$  predstavlja razliku potencijala na koji dolazi uzemljivač prilikom odvođenja struje kvara u tlo i potencijala referentne zemlje i zavisi od struje odvođenja i otpora rasprostiranja: [3]

$$U_u = R_u \cdot I_u \quad (4)$$

gdje  $I_u$  predstavlja struju koja se odvodi sa uzemljivača (struju jednofaznog zemljospoja).

Zavisnost struja odvođenja pojedinih grana uzemljivača od napona uzemljivača je predstavljena sljedećom relacijom čijim se rješavanjem po  $I$  dobija vektor struja odvođenja  $[I]$ : [3]

$$[R][I] = [1]U_u \quad (5)$$

## III. ODREĐIVANJE IZLAZNIH VELIČINA APLIKACIJE

Izlazne veličine koje aplikacija generiše su:

- Potencijal tačaka na površini tla pri odvođenju struje jednofaznog zemljospoja  $I_u$ .
- Napon dodira  $U_d$  tačaka na površini tla pri odvođenju struje jednofaznog zemljospoja  $I_u$ .
- Napon koraka  $U_k$  tačaka na površini tla pri odvođenju struje jednofaznog zemljospoja  $I_u$ .

Potencijal proizvoljne tačke A na površini tla je izračunat kao superpozicija potencijala u toj tački koji potiču od struje koja se odvodi sa svake grane uzemljivača i za uzemljivač sa  $N$  grana se može predstaviti relacijom:

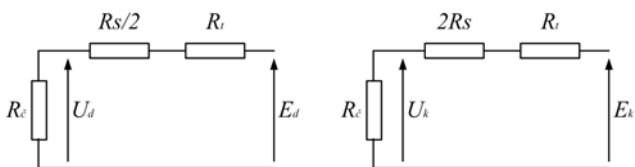
$$V_A = \sum_{i=1}^N \left( \frac{\rho}{4\pi L_i} \cdot \ln \frac{r_{1i} + r_{2i} + L_i}{r_{1i} + r_{2i} - L_i} \cdot I_i \right) \quad (6)$$

Naponi su  $U_d$  i  $U_k$  određeni prema zamjenskim šemama prikazanim na Sl. 3 gdje  $E_d$  i  $E_k$  predstavljaju razliku potencijala uzemljivača i tačke na površini tla za koju se određuju napon dodira i napon koraka,  $R_c$  otpornost čovječijeg tijela, a  $R_s$  prelaznu otpornost stopalo-tlo [3], [5]. Prema zamjenskim šemama za napon dodira i napon koraka sa Sl. 3, naponi  $U_d$  i  $U_k$  su dati relacijama:

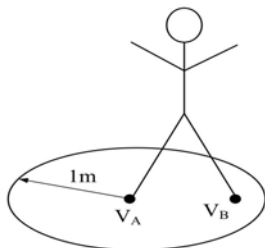
$$U_d = \frac{R_c}{R_c + \frac{R_s}{2}} \cdot E_d \quad (7)$$

$$U_k = \frac{R_c}{R_c + 2R_s} \cdot E_k \quad (8)$$

Važno je napomenuti da se napon dodira i napon koraka izračunavaju na opisani način i za tačke na površini tla koje ne pripadaju projekciji konture uzemljivača na ravan površine tla. Međutim, nije od velikog značaja napon dodira izračunavati u tačkama koje su udaljene od projekcije uzemljivača na ravan površine tla iz razloga što se obično teži da se uzemljivač prošire cijelom površinom postrojenja, a takođe i da dijelovi uzemljivačkog sistema nisu slobodno dostupni van pomenute površine. Napon koraka ima smisla izračunavati i u tačkama na površini tla izvan pomenute površine, ali u tom slučaju  $E_k$  predstavlja maksimalnu razliku potencijala tačke na površini tla za koju izračunavamo (A) napon koraka i proizvoljne tačke koja je udaljena od tačke A 1 najviše 1 m, tj pripada krugu prikazanim na Sl. 4. na kojoj je data ilustracija situacije za napon koraka izvan pomenute površine. Iz relacija (7) i (8) se vidi da je napon dodira kritičniji od napona koraka.



Slika 3. Zamjenske šeme za određivanje napona dodira i napona koraka



Slika 4. Napon koraka van konture uzemljivača

#### IV. OPIS APLIKACIJE

Aplikacija ima jednostavnu formu sa jasno istaknutim poljima za unos i ispis rezultata proračuna. Prozor aplikacije je prikazan na Sl. 5. Ulazne vrijednosti koje su neophodne za proračun su:

- *Struja odvođenja*- Struja jednofaznog zemljospoja koja se odvodi sa uzemljivača u [A].
- *Specifična otpornost tla*- Specifična otpornost tla u koje je postavljen uzemljivač [ $\Omega\text{m}$ ]
- *Broj segmenata*- Broj segmenata na koji se dijeli svaki od provodnika pro proračunu međusobnih otpornosti.
- *Rezolucija prikaza*- Rastojanje između izračunskih tačaka izlaznih veličina.
- *Plot Offset*- Rastojanje od konture uzemljivača do kraja prikaza po X i Y osi.

Ove vrijednosti je potrebno unijeti u odgovarajuća polja u prozoru aplikacije. Kao decimalni separator se koristi tačka.

Klikom na dugme *Izaberi datoteku* u dijelu *AutoCAD uvoz* se nudi opcija odabira AutoCAD modela uzemljivača koji se analizira. Nakon analize na naslovnoj strani se ispisuju maksimalne vrijednosti potencijala tla, napona dodira i napona koraka u odgovarajućim poljima, a u odvojenim prozorima se pojavljuju kombinovani 2D i 3D grafički prikazi izlaznih veličina.

Slika 5. Prozor sa ulaznim i izlaznim vrijednostima

#### V. REZULTATI PRORAČUNA

Analiziran je uzemljivač sa Sl. 1 koji se nalazi u homogenom tlu specifične otpornosti 100  $\Omega\text{m}$  i odvodi struju jednofaznog zemljospoja od 1600 A. Određivanje međusobnih otpornosti pojedinih grana uzemljivača je sprovedeno podjelom svake grane na 50 segmenata. Izlazni podaci su prikazani za pravougaonu konturu dužine 70 m i širine 58 m koncentričnu konturi uzemljivača, što je definisano unosom vrijednosti 5 m u

polju *plot offset*. Izlazne veličine su izračunate na svakih 1 m. U proračunima je za otpornost ljudskog tijela usvojena vrijednost od 1000 Ω [6]. Podaci o maksimalnim vrijednosima potencijala na površini tla, napona dodira i napona koraka su prikazani u tabeli 1.

Naponi  $U_d$  i  $U_k$  treba da budu manji od maksimalne dozvoljene vrijednosti za napon kome ljudsko tijelo smije biti izloženo  $U_{doz}$ . Napon  $U_{doz}$  zavisi od vremena trajanja zemljospoja  $t$ : [7]

$$U_{doz} = \frac{75}{t} \quad (14)$$

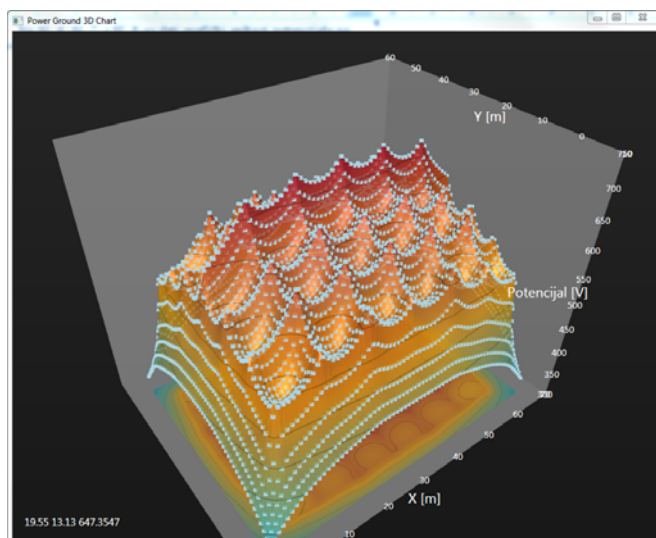
Vrijeme trajanja zemljospoja je uslovljeno vremenom reagovanja relejne zaštite, a usvojena je vrijednost 0,2 s, [7] tako da napon dodira i napon koraka ne smiju prevazići vrijednost od 375 V. Poređenjem sa vrijednostima iz tabele 1 se zaključuje da se uzemljivač može koristiti za odvođenje navedene struje bez dodatnih mjera za suzbijanje pojave opasnih napona.

TABELA I. MAKSIMALNE VRIJEDNOSTI IZLAZNIH VELIČINA

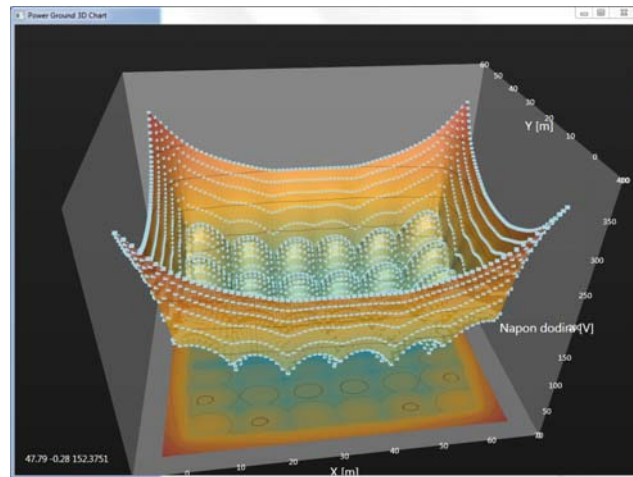
Potencijal na površini tla	Napon dodira	Napon koraka
738,95 V	352,77 V	34,03 V

Napon koraka je izračunat prema Sl. 4 i za površinu iznad konture uzemljivača, te zbog toga ima značajno manju vrijednost on napona dodira. Međutim, shodno šemama sa Sl. 3, napon dodira je uvijek veći od napona koraka, tako da je napon dodira relevantan za to područje.

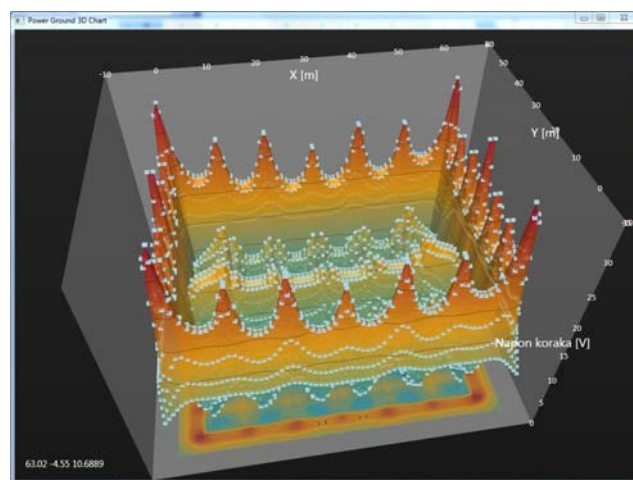
Na Sl. 6, Sl. 7. i Sl. 8 su dati grafički prikazi potencijala na površini tla, napona dodira i napona koraka, respektivno.



Slika 6. Prikaz potencijala površine tla iznad uzemljivača



Slika 7. Grafički prikaz vrijednosti napona dodira



Slika 8. Grafički prikaz vrijednosti napona koraka

## VI. ZAKLJUČAK

Aplikacija razvijena u C# programskom jeziku za modelovanje uzemljivača i analizu propratnih efekata odvođenja struje zemljospoja sa njega u vidu potencijalno opasnih napona dodira i napona koraka se uspješno može primijeniti u analizi različitih vrsta uzemljivača. Pogodnost aplikacije je u učitavanju podataka o geometriji uzemljivača iz AutoCAD datoteke što značajno olakšava taj posao, a ujedno smanjuje mogućnost greške pri unosu, pogotovo kod složenih uzemljivača sa velikim brojem elemenata. Takođe je jednostavnim modifikovanjem AutoCAD datoteke moguće u realnom vremenu sagledati efekte modifikacije uzemljivača na izlazne veličine. Odgovarajući 2D i 3D dijagrami pružaju mogućnost jasnog uočavanja mjesta koja ne zadovoljavaju u pogledu opasnih napona, a korisnik lako na osnovu grafičkog prikaza preptostavi akciju koja će dovesti do rješavanja tog problema.

#### LITERATURA

- [1] J. He, R. Zeng, B. Zhang "Methodology and Technology for Power System Grounding", John Wiley & Sons, Singapore, 2013.
- [2] J. Nahman, "Uzemljenje neutralne tačke distributivnih mreža", Naučna knjiga, Beograd, 2005.
- [3] J. Nahman, V. Mijailović, "Razvodna postrojenja", Akademska misao, Beograd, 2005.
- [4] Pravilnik o metrološkim uslovima za merila električne otpornosti uzemljenja, "Sl. list SRJ", br. 34/98 i 40/98 - ispr.
- [5] Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, Službeni list SRJ, br. 61/95.
- [6] G. Biegelmeier, "Report on the electrical impedance of the human body", IEC, Tehnical Committee No. 23, Austria, 1978.
- [7] W. Rebizant, J. Szafran, A. Wiszniewski, "Digital signal processing in power system protection and control", Springer, New York, 2011.

#### ABSTRACT

This paper describes the process of modeling the complex grounding system of arbitrary geometry using specially

developed application in C #. Application based on the geometry of the ground electrode taken from its AutoCAD model, as well as data on single-phase short-circuit current and the specific resistance of the soil calculates propagation resistance of grounding system, potential points on the ground surface above the ground electrode, and touch voltage and step voltage in these points. The results are shown graphically through 2D and 3D charts.

*Key words - grounding system, grounding resistance, soil potential, touch voltage, step voltage, AutoCAD, C # application*

#### **MODELING OF COMPLEX GROUNDING SYSTEM BY C# APPLICATION**

Milan Ivezić  
Aleksandar Jovanović  
Milan Jović  
Borko Čupić