

# Edukativni softver za dimenzionisanje uzemljivača elektroenergetskih postrojenja na bazi metode konačnih elemenata

Nemanja Kitić, Čedomir Zeljković, Petar Matić  
 Univerzitet u Banjoj Luci, Elektrotehnički fakultet,  
 Banja Luka, Republika Srpska, BiH  
 nemanja.kitic@etf.unibl.org

**Sažetak**—U okviru rada je opisan edukativni softver za dimenzionisanje uzemljivača elektroenergetskih postrojenja sa mogućnošću trodimenzionalne vizualizacije raspodjele potencijala tla iznad uzemljivača. Izvršena je uporedna analiza rezultata dobijenih edukativnim i komercijalnim softverom za dimenzionisanje uzemljivača, na realnom elektroenergetskom postrojenju. U okviru edukativnog softvera mijenjani su ulazni parametri simulacije uz posmatranje ukupnog trajanja simulacije i promjene izlaznih vrijednosti.

**Ključne riječi - uzemljenje; napon koraka; napon dodira; otpornost uzemljenja;**

## I. UVOD

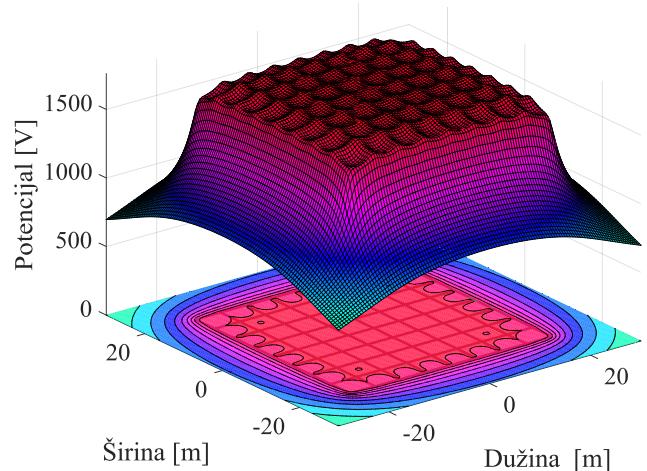
Razvoj elektroenergetskih sistema u pravcu sve viših naponskih nivoa, većih prenosnih kapaciteta i rastojanja, te primjene modernih tehnologija postavlja visoke zahtjeve vezane za siguran, pouzdan i ekonomičan rad elektroenergetskih sistema. Stoga, jedan od bitnih preduslova za postizanje navedenih zahtjeva je propisno uzemljenje elektroenergetskih postrojenja i svih metalnih elemenata u postrojenjima.

Primarni ciljevi zaština uzemljenja su da obezbijede sigurnost ljudi i svih drugih živilih bića unutar elektroenergetskih postrojenja, te da osiguraju odvođenje velikih struja kvarova u zemlju i pouzdan rad sistema [1]. Misleći u prvom redu na čovjekovu zaštitu, došlo se do pojmoveva kao što su napon dodira i napon koraka, čije se vrijednosti, dozvoljene standardima [2], ne smiju prekoračiti pri poremećaju u elektroenergetskom sistemu. Da bi se napon dodira i napon koraka zadržali u dozvoljenim granicama, zaštitni uzemljivač mora pružati što manju električnu otpornost rasprostiranju struje uzemljivača, dok kod radnih uzemljivača ovo ne mora biti slučaj.

Uzemljivač predstavlja sistem provodnika ukopanih u zemlju, koji svojim oblikom i dimenzijama, u skladu sa karakteristikama okolnih slojeva zemljišta, treba da spriječi štetne posljedice koje nastaju pri poremećaju u elektroenergetskom sistemu ili samom postrojenju [3]. Tačnije, uzemljivač treba da onemogući stvaranje napona opasnih po čovjeka. Tipični uzemljivač u elektroenergetskom postrojenju je realizovan horizontalnim provodnicima koji su povezani u uzemljivačku mrežu, te vertikalnim sondama (štapovima), koje

su povezane u čvorove mreže. Usljed proticanja struje kroz uzemljivač i otpornosti uzemljenja, sam uzemljivač, a i zemljište oko njega dolazi na određeni potencijal u odnosu na nullu potencijalnu tačku u beskonačnosti. U zavisnosti od oblika uzemljivača potencijal tla iznad uzemljivača može biti različitih oblika, počevši od kupastog za štapni uzemljivač, pa sve do komplikovanog trodimenzionalnog oblika sa bregovima i dolinama za mrežasti uzemljivač [3], što je prikazano na Sl. 1.

Za uspješan proračun uzemljivača elektroenergetskog postrojenja potrebno je razmotriti veliki broj ulaznih tehničkih i ekonomskih parametara, kao što su, struktura zemljišta, maksimalna struja kvara, uticaj relejne zaštite i drugi. Veliki broj ulaznih parametra implicira složene matematičke operacije sa velikom dimenzionalnošću problema. Zbog toga se pri projektovanju uzemljivača koriste različiti softveri koji imaju mogućnost proračuna, simulacije i vizualizacije parametara uzemljivača. Uobičajen način za proračun parametara uzemljivača je metoda konačnih elemenata. U zavisnosti od površine uzemljivača, tj. ukupne dužine svih provodnika koji čine uzemljivač softverske simulacije i proračuni mogu trajati veoma dugo. Često zbog velike dimenzionalnosti problema potrebno je procijeniti sa kolikom rezolucijom se mogu podijeliti provodnici koji čine uzemljivačku mrežu, a da se u razumnom vremenu dobiju zadovoljavajući rezultati.



Slika 1. Raspored potencijala tla iznad mrežastog uzemljivača

Za edukativne potrebe Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Banjoj Luci kreiran je softver za proračun osnovnih parametara uzemljivača, pomoću koga se vrši proračun na konačnom broju segmenata uzemljivača. U okviru edukativnog softvera moguće je zadati proizvoljan izgled uzemljivačke mreže, a zatim na osnovu ostalih ulaznih parametara, koje zadaje korisnik, program proračunava potencijal uzemljivača i otpornost uzemljenja. U okviru edukativnog softvera implementirano je trodimenzionalno iscrtavanje raspodjele potencijala iznad uzemljivačke mreže.

U radu su dati teorijski osnovi uzemljivačkih sistema, opisan je algoritam edukativnog softvera za dimenzionisanje uzemljivača. Nadalje je predstavljeno testno elektroenergetsko postrojenje, a zatim su izvršene simulacije. Na uzemljivaču testnog postrojenja analizirana je promjena izlaznih veličina (otpornosti uzemljenja i potencijala uzemljivača) u zavisnosti od rezolucije podjele uzemljivača. Posmatrano je ukupno trajanje proračuna u zavisnosti od promjene ulaznih varijabli. Kao program za uporednu analizu rezultata korišćen je softver CYMGRD 7.0 [4].

## II. TEORIJSKI OSNOVI

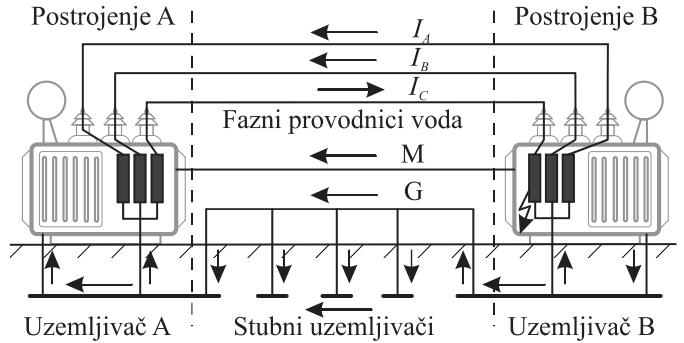
Pod uzemljenjem se podrazumijeva galvanska veza zemlje i metalnog uzemljenog dijela električnog uređaja, postrojenja ili neke tačke mreže koja iz bilo kog razloga može biti pod naponom, pomoću uzemljivača [5]. Osnovni parametar koji u električnom smislu karakteriše uzemljivače i sisteme uzemljenja je otpornost uzemljenja ( $R_{uz}$ ). Otpornost uzemljenja se definije kao količnik napona na uzemljenom uređaju u odnosu na nultu potencijalnu tačku u beskonačnosti (eng. *Remote Earth*) i struje koja se injektuje u zemlju putem uzemljivača. Struja uzemljivača ( $I_{uz}$ ) predstavlja struju koju uzemljivač odaje u okolno zemljište ili je prima iz zemljišta, tj. struja koja pri kvarovima sa zemljom protiče kroz uzemljivač i podiže mu potencijal u odnosu na režim bez kvara. Potencijal uzemljivača ( $V_{uz} = R_{uz}I_{uz}$ ) je potencijal uzemljivača u odnosu na nultu potencijalnu tačku u beskonačnosti, tj. „daleku“ ili „referentnu“ zemlju, čiji je potencijal  $V_{ref} = 0$ . Napon uzemljivača je jednak njegovom potencijalu ( $U_{uz} = V_{uz} - V_{ref} = V_{uz}$ ). Kao još dva bitna električna parametra uzemljivača navode se potencijalna razlika dodira ( $E_d$ ) i potencijalna razlika koraka ( $E_k$ ). Potencijalna razlika dodira ( $E_d = V_{uz} - V_{tl}$ ) je razlika potencijala uzemljivača i neke tačke na tlu postrojenja, kojoj je osoba izložena pri dodiru metalnog uzemljenog objekta, dok se potencijalna razlika koraka definije kao razlika potencijala dvije tačke ( $a$  i  $b$ ) na rastojanju od 1 m na tlu postrojenja ( $E_k = V^a_{tl} - V^b_{tl}$ ).

### A. Određivanje struje uzemljivača

Struja uzemljivača, tj. struja koju uzemljivač odvodi u okolno zemljište ili prima iz zemljišta, može biti jednaka ili različita od struje kvara sa zemljom. Na struju uzemljivača elektroenergetskog postrojenja prvenstveno utiče konfiguracija mreže, ali i vrsta postrojenja, postojanje zaštitne užadi na nadzemnim vodovima i naponski nivo susjednih postrojenja.

Ukoliko se posmatraju dva postrojenja povezana nadzemnim vodom sa zaštitnim užetom, u zavisnosti od toga da li su zvjezdista transformatora uzemljena ili ne, mogu se pojavit različite raspodjele struje kvara u postrojenjima [3].

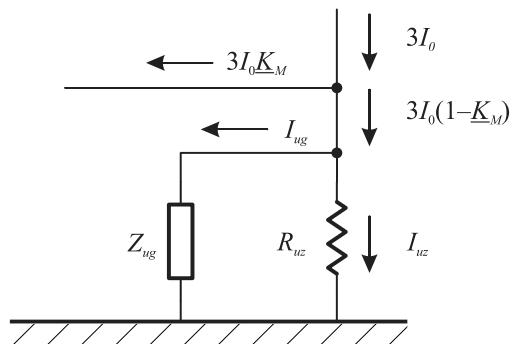
Jedna tipična konfiguracija postrojenja i raspodjela struje kvara prikazana je na Sl. 2. Neutralne tačke transformatora su u oba postrojenja uzemljene i povezane na uzemljivače u postrojenjima. Nadzemni vod, tj. zaštitno uže je uzemljeno na krajevima u postrojenjima, ali i sukcesivno, duž trase voda, pomoću stubnih uzemljivača.



Slika 2. Raspodjela struje kvara između postrojenja

Na Sl. 2 možemo uočiti da se kvar desio u postrojenju B, te da struja kvara jednim dijelom preko uzemljivača u postrojenju B odlazi kroz zemlju, a drugim dijelom kroz zaštitno uže povezno nadzemnog voda. Za potrebe određivanja struje koja zaštitnim užetom nadzemnog voda odlazi u postrojenje bez kvara, zaštitno uže se modeluje sa dva provodnika, M (magnetski spregnut sa faznim provodnicima i nije uzemljen na stubovima), te G (nije magnetski spregnut sa faznim provodnicima, a uzemljen je na stubovima i u postrojenjima).

Nakon određivanja vrijednosti struje koja odlazi preko zaštitnog užeta nadzemnog voda, određuje se konačna raspodjela struje u postrojenju sa kvarom (Sl. 3) i struja uzemljivača:



Slika 3. Konačna raspodjela struje kvara

$$I_{uz} = \frac{|Z_{ug}| |1 - K_M|}{|Z_{ug} + R_{uz}|} 3I_0 = r \cdot 3I_0, \quad (1)$$

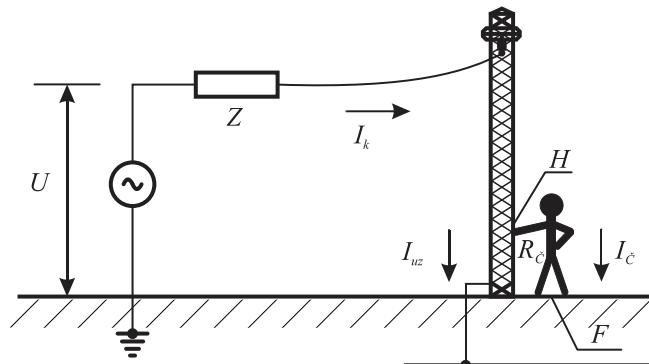
pri čemu je  $Z_{ug}$  ulazna impedansa dijela zaštitnog užeta G,  $K_M$  koeficijent odvođenja struje uslijed magnetske sprege zaštitnog užeta i faznih provodnika,  $r$  redukcioni faktor zaštitnog užeta i  $R_{uz}$  otpornost uzemljenja postrojenja sa kvarom.

### B. Napon dodira i napon koraka

U normalnim radnim režimima potencijal uzemljivača u elektroenergetskim postrojenjima je približno jednak nuli, tj.

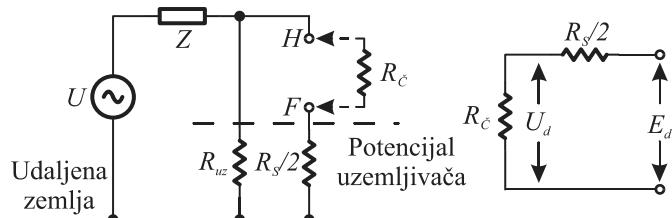
približno je jednak tački nultog potencijala u beskonačnosti. U režimima sa kvarom kroz uzemljivač može da protiče struja koja uslijed otpornosti uzemljenja stvara veliki pad napon na samom uzemljivaču i okolnom zemljištu. Slojevi zemljišta koji su bliži ukopanom uzemljivaču pružaju veću električnu otpornost proticanju struje pa samim tim na sebe preuzimaju veće padove napona. Padovi napona koji se javljaju u režimima sa kvarom mogu biti velikih vrijednosti i veoma opasni po čovjeka. U standardima su definisane specifične situacije izlaganjima naponu dodira i koraka [1].

Tipična situacija izlaganja naponu dodira ilustrovana je na Sl. 4, na kojoj su označeni fazni napon ( $U$ ), impedansa sistema ( $Z$ ), struja kvara ( $I_k$ ), struja uzemljivača ( $I_{uz}$ ), struja kroz čovjeka ( $I_c$ ), otpornost čovjeka ( $R_c$ ), kao i tačka u kojoj čovjek rukom dodiruje metalni objekat ( $H$ ) i tačka na kojoj čovjek stoji na tlu postrojenja ( $F$ ).



Slika 4. Izlaganje naponu dodira

Ekvivalentna električna šema koja odgovara situaciji ilustrovanoj na Sl. 4, prikazana je na Sl. 5. Na ekvivalentnoj šemi označena je prelazna otpornost stopalo-tlo ( $R_s$ ), otpornost uzemljenja ( $R_{uz}$ ) kao i potencijalna razlika dodira ( $E_d$ ) i napon dodira ( $U_d$ ).

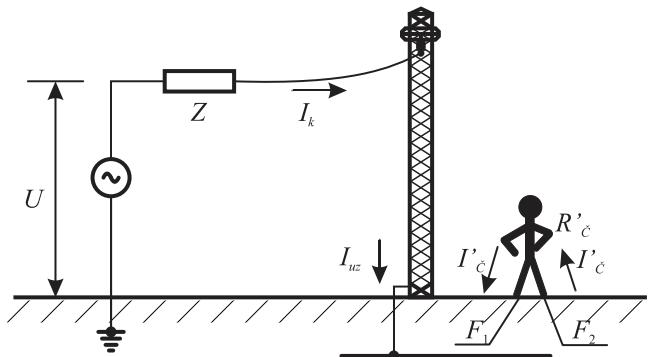


Slika 5. Ekvivalentna šema izlaganja naponu dodira

Na osnovu ekvivalentne šeme sa Sl. 5, napon dodira se računa prema izrazu:

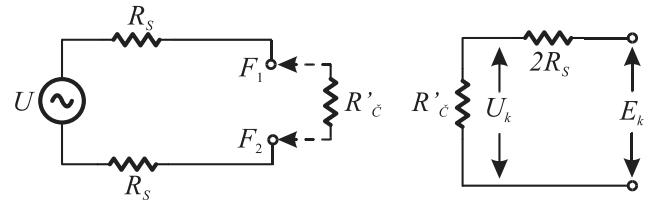
$$U_d = \frac{E_d}{R_c + \frac{R_s}{2}} R_c. \quad (2)$$

Na Sl. 6 ilustrovana je tipična situacija izlaganja naponu koraka, a oznake su identične onima koje su korišćene na Sl. 4. Osnovna razlika je u tome što su pri izlaganju naponu koraka noge razmaknute za dužinu jednog koraka (1 m), te su stoga na Sl. 6 označene dvije tačke na tlu  $F_1$  i  $F_2$ .



Slika 6. Izlaganje naponu koraka

Ekvivalentna električna šema koja odgovara situaciji ilustrovanoj na Sl. 6, prikazana je na Sl. 7. Na ekvivalentnoj šemi označeni su prelazna otpornost stopalo-tlo ( $R_s$ ), otpornost uzemljenja ( $R_{uz}$ ), otpornost čovjeka pri čemu se strujni put zatvara samo kroz noge ( $R'_c$ ), kao i potencijalna razlika koraka ( $E_k$ ) i napon koraka ( $U_k$ ).



Slika 7. Ekvivalentna šema izlaganja naponu koraka

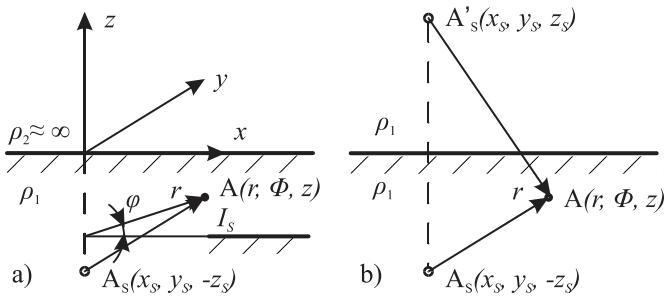
Na osnovu ekvivalentne šeme sa Sl. 7, napon koraka se računa prema izrazu:

$$U_k = \frac{E_k}{R'_c + 2R_s} R'_c. \quad (3)$$

### C. Proračun otpornosti uzemljenja i raspodjele potencijala u zemljištu

Problem proračunavanja parametara uzemljivača u najvećoj mjeri zavisi od geometrije samog uzemljivača. Za jednostavne uzemljivače, u vidu usamljene sonde horizontalno ili vertikalno ukopane u zemlju mogu se izvesti analitički izrazi za otpornost uzemljenja i raspodjelu potencijala u zemljištu oko uzemljivača [5], [6]. U praksi se za uzemljivače elektroenergetskih postrojenja najčešće koriste mrežasti uzemljivači. Za proračun parametara takvih, složenijih, uzemljivačkih sistema, u praksi se obično koriste numeričke metode (matrične i integraciono matrične metode) [5] – [7].

Osnovu svih numeričkih proračuna parametara složenih uzemljivačkih sistema predstavlja tačkasti, beskonačno mali, uzemljivač u tački  $A_s$ , sa Sl. 8a. Pretpostavlja se da u zemlji specifične otpornosti  $\rho_1$ , sa tačkastog uzemljivača odlazi struja  $I_s$ , a zatim se određuje potencijal tačke A u zemlji. Ispostavlja se da se opisani problem rješava uvođenjem imaginarnog lika stvarnog uzemljivača, koji se nalazi u istoj sredini kao i stvarni uzemljivač, što je prikazano na Sl. 8b [5], [6].



Slika 8. a) Tačkasti uzemljivač, b) Imaginarni lik uzemljivača

Potencijal tačke A uz prelazak u *Descartes*-ov koordinatni sistem, prema [5] je:

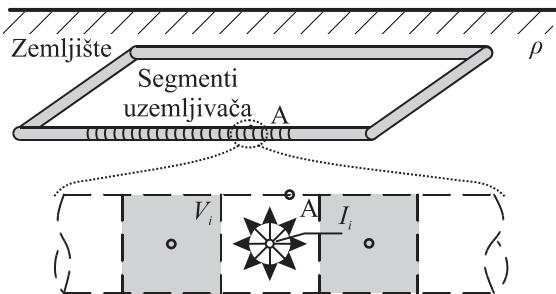
$$V = \frac{I_s \rho_1}{4\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{(x-x_s)^2 + (y-y_s)^2 + (z-z_s)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x+x_s)^2 + (y+y_s)^2 + (z+z_s)^2}} \right]. \quad (4)$$

### III. ALGORITAM EDUKATIVNOG SOFTVERA

U okviru edukativnog softvera za proračun parametara uzemljivača, koji je predmet ovog rada, implementiran je numerički matrični metod koji je detaljno opisan u [6]. Princip matričnog metoda proračuna parametara uzemljivača zasnovan je na podjeli uzemljivačke mreže na segmenate uzemljivača, što je prikazano na Sl. 9. Kako su dimenzije pojedinačnih segmenata za nekoliko redova veličine manji od dimenzija cijelog uzemljivača, segmenti se aproksimiraju tačkastim izvorima struje  $I_i$ . Prema izrazu (4) za potencijal tačke A, može se dobiti potencijal  $i$ -tog segmenta u tački A sa Sl. 9:

$$V_i = \sum_{j=1}^n \frac{\rho}{4\pi} \left[ \frac{1}{\sqrt{(x_{Ai} - x_j)^2 + (y_{Ai} - y_j)^2 + (z_{Ai} - z_j)^2}} + \frac{1}{\sqrt{(x_{Ai} + x_j)^2 + (y_{Ai} + y_j)^2 + (z_{Ai} + z_j)^2}} \right] I_j, \quad (5)$$

gdje je  $n$  broj segmenata uzemljivača,  $x_{Ai}$ ,  $y_{Ai}$  i  $z_{Ai}$  koordinate tačke A na površini  $i$ -tog segmenta,  $x_j$ ,  $y_j$  i  $z_j$  koordinate centra  $j$ -tog segmenta, te  $I_j$  struja koja izlazi iz  $j$ -tog segmenta.



Slika 9. Ilustracija matričnog metoda

Uzemljivači elektroenergetskih postrojenja se izvode provodnicima koji imaju veliku specifičnu provodnost, te su svi potencijali  $V_i$ ,  $i=1,2,3,\dots,n$ , jednaki. Na osnovu navedene činjenice, prethodni sistem jednačina se može zapisati u matričnom obliku:

$$[V_i]_{n \times 1} = [VDF_{i,j}]_{n \times n} [I_i]_{n \times 1}, \quad (6)$$

gdje je  $I_i$  struja segmenata  $i=1,2,3,\dots,n$ ,  $VDF_{i,j} = f(x_{Ai}, y_{Ai}, z_{Ai}, x_j, y_j, z_j, \rho^{-1})$  distribucioni faktor potencijala (eng. *Voltage Distribution Factor*) za  $i=1,2,3,\dots,n$  i  $j=1,2,3,\dots,n$ .

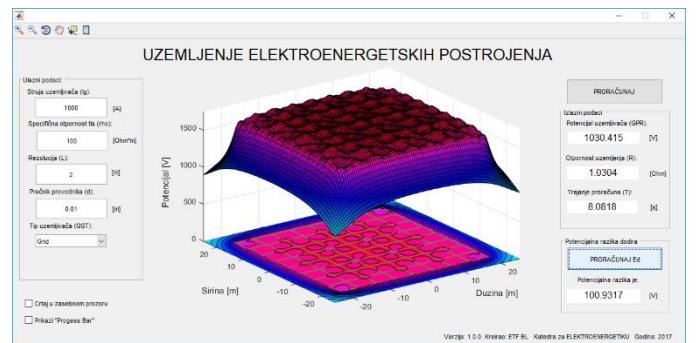
Otpornost uzemljenja se računa kao:

$$R_{uz} = \frac{1}{[1 \ 1 \ \dots \ 1]_{1 \times n} \left( [VDF_{i,j}]_{n \times n}^{-1} ([1 \ 1 \ \dots \ 1]_{1 \times n})^T \right)}. \quad (7)$$

Edukativni softver za proračun parametara uzemljivača može biti implementiran u bilo kojem višem programskom jeziku, ali ako se radi o matričnom proračunu parametara uzemljivača, pri čemu je potrebna i trodimenzionalna vizualizacija rasporeda potencijala na površini tla iznad uzemljivača, kao programski paket za implementaciju nameću se MATLAB ili Octave.

Prvi korak proračuna parametara uzemljivača predstavlja definisanje uzemljivačke mreže, na način da se zadaju početna i krajnja tačka u trodimenzionalnom prostoru, koje reprezentuju tačke u prostoru između kojih se nalazi jedan provodnik uzemljivačke mreže. Ovo se ponavlja dok se ne definišu svi provodnici uzemljivačke mreže. Nakon toga se unose vrijednosti struje uzemljivača, specifične otpornosti tla, rezolucija (dužina segmenta) i prečnik provodnika uzemljivačke mreže. Na osnovu unesenih vrijednosti nadalje se vrši proračun. Program izvršava funkciju za podjelu uzemljivačke mreže na segmente. Zatim se izvršava funkcija koja računa distribucione faktore potencijala, izrazima (5) i (6). Na osnovu izračunatih distribucionih faktora, proračunavaju se otpornost uzemljenja i potencijal uzemljivača, te struja svakog pojedinačnog segmenta. Nапослјетку се izračunava raspodjela potencijala za svaku tačku u prostoru iznad definisanog uzemljivača.

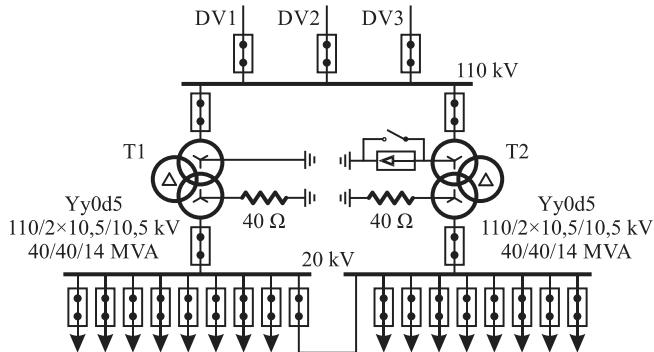
Za opisani program napravljen je i grafički korisnički interfejs (GUI) koji je prikazan na Sl. 10. U okviru GUI programa moguće je izvršiti unos svih navedenih ulaznih promjenljivih, a zatim i pročitati vrijednosti izlaznih parametara uzemljivača.



Slika 10. Grafički korisnički interfejs edukativnog softvera

#### IV. TESTNO ELEKTROENERGETSKO POSTROJENJE

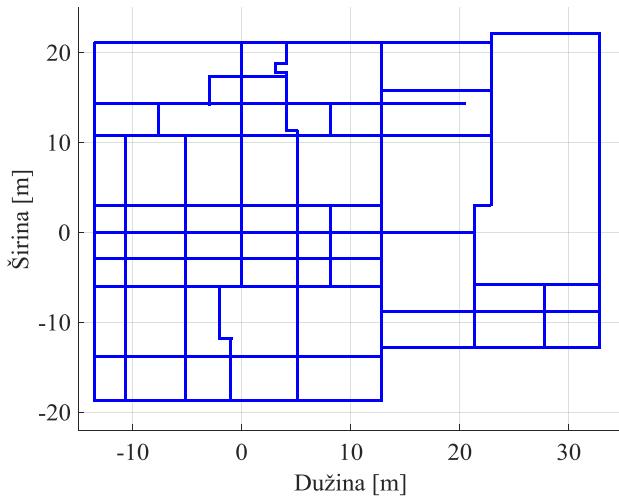
Testiranje edukativnog softvera i poređenje dobijenih rezultata sa komercijalnim softverom je urađeno na uzemljivačkoj mreži jedne postojeće distributivne transformatorske stanice 110/20 kV, sa područja grada Banja Luka, čija je uprošćena jednopolna šema prikazana na Sl. 11.



Slika 11. Uprošćena jednopolna šema testnog postrojenja

U projektu transformatorske stanice struja za koju je projektovan uzemljivač u transformatorskoj stanicu iznosi 3419 A. Kako je transformatorska stanica opremljena mikroprocesorskim zaštitama i prekidačima sa vakuumskom i SF6 tehnologijom, za vrijeme isključenja kvara uzeto je  $t = 0,5$  s, iako je stvarno vrijeme isključenja nešto kraće, pa su dobijeni rezultati na strani sigurnosti.

Prema projektu uzemljivačka mreža pomenute distributivne transformatorske stanice 110/20 kV je sačinjena od bakarnih provodnika (užadi) poprečnog presjeka  $50 \text{ mm}^2$ , koji su ukopani na dubinu od 0,65 m. Žemljiste u koje je ukopana uzemljivačka mreža je homogeno sa specifičnom otpornošću  $\rho = 50 \Omega\text{m}$ . Uzemljivačka mreža distributivne TS 110/20 kV je prikazana na Sl. 12.



Slika 12. Izgled uzemljivačke mreže testnog postrojenja

#### V. SIMULACIJA I ANALIZA REZULTATA

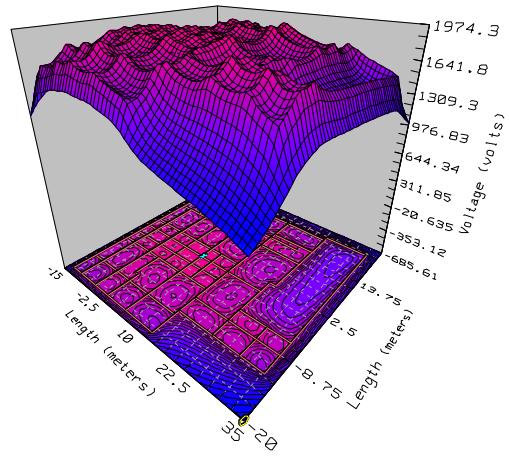
U okviru edukativnog i komercijalnog softvera formirana je uzemljivačka mreža testnog elektroenergetskog postrojenja, za

ulazne parametre iz Tabele I raspodjela potencijala iznad uzemljivačke mreže je prikazana na Sl. 13 (komercijalni softver) i Sl. 14 (edukativni softver).

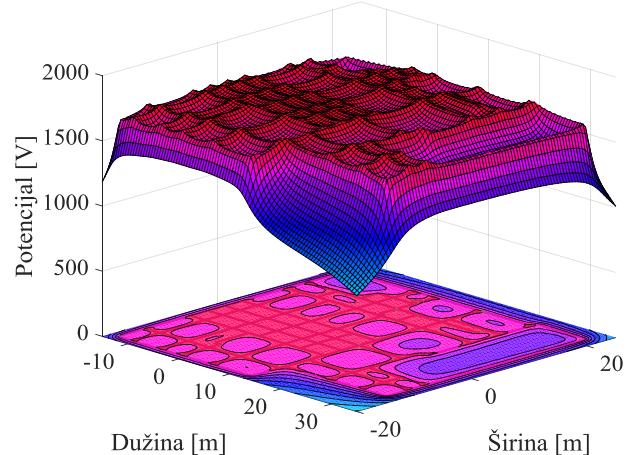
TABELA I.

ULAZNI PARAMETRI ZA PRORAČUN

Parametar	Oznaka	Vrijednost	Jedinica
Struja uzemljivača	$I_g$	3419	A
Specifična otpornost zemljišta	$\rho$	50	$\Omega\text{m}$
Rezolucija (dužina segmenta)	$L$	0,5	m
Prečnik provodnika	$d$	7.979	mm
Vrijeme isključenja kvara	$t$	0,5	s
Udaljenost mjernih sondi	$r$	5	m
Frekvencija	$f$	50	Hz



Slika 13. Raspodjela potencijala iznad testne uzemljivačke mreže (CYMGRD 7.0)



Slika 14. Raspored potencijala iznad testne uzemljivačke mreže (edukativni softver)

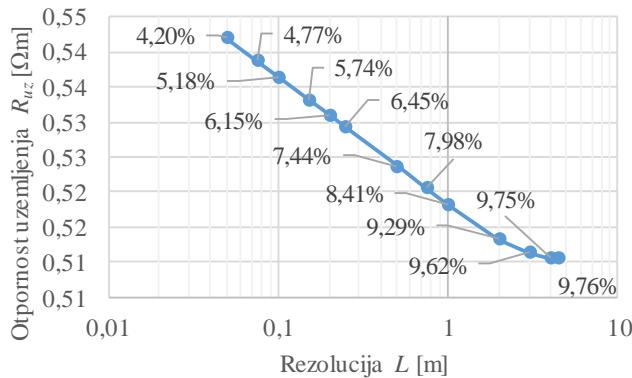
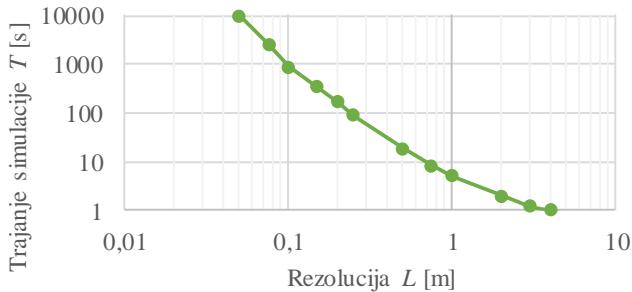
Vrijednosti za potencijal uzemljivača i otpornosti uzemljenja koji se dobiju nakon simulacija prikazani su u Tabeli II.

TABELA II. IZLAZNE VRIJEDNOSTI

Parametar	Vrijednost		Relativna greška
	Komercijalni softver	Edukativni softver	
$U_{uz}$	1994,93 [V]	1790.42 [V]	10.2515%
$R_{uz}$	0,565752 [ $\Omega$ ]	0,523667 [ $\Omega$ ]	7.4387%

Analizirajući rezultate iz Tabele II, zaključujemo da edukativni softver za proračun parametara uzemljenja ostvaruje zadovoljavajuću tačnost. Tačnije za potencijal uzemljivača relativna greška je oko 10%, dok je rezultat za otpornost uzemljenja bolji, sa relativnom greškom ispod 10%.

Kao što je već rečeno, edukativni softver radi po metodi konačnih elemenata, te je veću tačnost moguće dobiti smanjenjem rezolucije  $L$ , tj. dužine segmenata uzemljivača. Na Sl. 15 je prikazana zavisnost otpornosti uzemljenja od rezolucije  $L$ , sa naznačenim relativnim greškama otpornosti uzemljenja. Za vrijednosti rezolucije preko 5 m edukativni softver nema zadovoljavajuće rezultate, dok se smanjenjem rezolucije relativna greška smanjuje, ali dužina trajanja simulacije značajno raste. Zavisnost dužine trajanja simulacije od rezolucije  $L$ , prikazana je na Sl. 16.

Slika 15. Zavisnost otpornosti uzemljenja od rezolucije  $L$ Slika 16. Zavisnost dužine trajanja simulacije od rezolucije  $L$ 

## VI. ZAKLJUČAK

U radu je opisan algoritam edukativnog softvera za proračun parametara uzemljivača elektroenergetskih postrojenja. Vrijednosti izlaznih parametra edukativnog softvera su upoređene sa vrijednostima koje se dobiju pri proračunu sa komercijalnim softverom, pri čemu je ostvarena zadovoljavajuća tačnost. Analiziran je uticaj promjene rezolucije (duzine segmenata uzemljivača) na otpornost uzemljenja, tačnost proračuna i dužinu trajanja simulacije. Edukativni softver je baziran na osnovnim teorijama proračuna uzemljivačkih sistema, te je njegova prednost što se lako može nadograditi i proširiti u raznim pravcima. Za buduće istraživanje i verzije edukativnog softvera trenutna ograničenja softvera mogu biti prevaziđena. Moguće je ugraditi proračune za maksimalno dozvoljene vrijednosti potencijalne razlike dodira i koraka prema IEEE standardima [2], kao i dvodimenzionalnu vizualizaciju raspodjele potencijala uzemljivača. Takođe, u okviru edukativnog softvera je moguće implementirati višeslojne modele zemljišta.

## LITERATURA

- [1] B. Mijatović, Č.Zeljković, "Computer-Assisted Performance Assessment of Outdoor Substation Grounding Systems," in *X International Symposium on Industrial Electronics INDEL 2014*, Banja Luka, 2014.
- [2] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding," in *IEEE Std 80-2000*, vol. no., pp.1-192, 4 Aug. 2000.
- [3] M. Đurić, Visokonaponska postrojenja, BEOPRES, Beograd, 2009.
- [4] CYMGRD, Substation Grounding Program, EATON, Cleveland, 2014.
- [5] F. Majdanžić, Uzemljivači i sustavi uzemljenja, GRAPHIS, Zagreb, 2004
- [6] A. P. Sakis Maliosopoulos, Power System Grounding and Transients, New York: Marcel Dekker, 1988.
- [7] J. He, R. Zang, B. Zhang, Methodology and Technology for Power System Grounding, Singapore: Wiley, 2012.

## ABSTRACT

In this paper, the educational software for dimensioning of the grounding system of power substations, with the possibility of three-dimensional visualization of ground surface potential is described. A comparative analysis of the results obtained by educational and commercial software for the grounding system design was performed on a real power substation. Within the educational software, the input parameters of the simulation were varied and total duration of the simulation and the change in the output values was observed.

## EDUCATIONAL SOFTWARE FOR POWER SUBSTATION GROUNDING DESIGN BASED ON FINITE ELEMENT METHOD

Nemanja Kitić, Čedomir Zeljković, Petar Matić