

DOI: [10.46793/CIGRE37.B3.05](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.B3.05)**B3.05****ANALIZA GALVANSKIH UTICAJA U OKOLINI UZEMLJIVAČA
TRANSFORMATORSKE STANICE U SLUČAJU ZEMLJOSPOJA****ANALYSIS OF CONDUCTIVE INTERFERENCE IN THE VICINITY OF THE
GROUNDING SYSTEM OF A SUBSTATION IN THE CASE OF A GROUND FAULT****Stefan Obradović*, Maja Grbić, Ranko Jasika, Aleksandar Pavlović**

Kratak sadržaj: U radu je analiziran galvanski uticaj uzemljivača transformatorske stanice na stambeni objekat. Objekat se nalazi unutar zaštitnog pojasa transformatorske stanice, što stvara rizik od prekomernih galvanskih uticaja u slučaju zemljospoja u transformatorskoj stanici. Galvanski uticaji mogu izazvati opasne potencijale u okolini transformatorske stanice, što može dovesti do pojave visokih vrednosti napona dodira i napona koraka u okolini objekta. Takođe, postoji opasnost od prenošenja tih potencijala na objekat i njegovu niskonaponsku instalaciju. U radu su analizirani navedeni uticaji i data je ocena rizika od izloženosti ljudi naponima dodira i naponima koraka i ocena rizika za električne instalacije u objektu.

Ključne reči: *galvanski uticaj, uzemljivač, zemljospoj, napon dodira, napon koraka*

Abstract: The paper analyzes the conductive interference of the electrical substation grounding system on a residential building. The building is located within the protective zone of the electrical substation, which creates a risk of excessive conductive interference in the event of a ground fault in the substation. Conductive interference can produce dangerous potentials in the vicinity of the substation, potentially leading to the occurrence of high values of touch and step voltages around the building. Additionally, there is a risk of these potentials being transferred to the building and its low-voltage installation. The paper analyzes these effects and provides an assessment of the risk of exposure to touch and step voltages, as well as an evaluation of the risk for the installations within the building.

Keywords: *conductive interference, grounding system, ground fault, touch voltage, step voltage*

* Stefan Obradović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, stefan.obradovic@ieent.org

Maja Grbić, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, maja@ieent.org

Ranko Jasika, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, ranko.jasika@ieent.org

Aleksandar Pavlović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, aleksandar.pavlovic@ieent.org

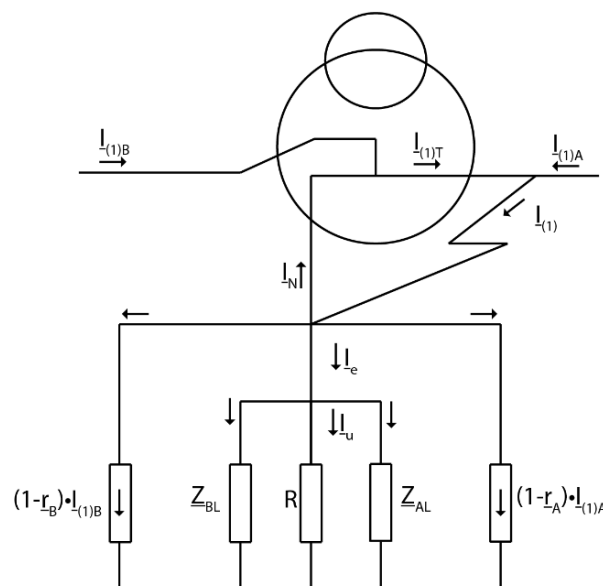
1 UVOD

Prilikom pojave jednofaznog zemljospoja u transformatorskoj stanici struja kvara se jednim delom vraća ka izvoru (uzemljene neutralne tačke energetske transformatora) preko zaštitnih zemljovodnih užadi nadzemnih vodova i metalnih plašteva energetskih kablova, dok se preostali deo struje kvara odvodi u zemlju preko uzemljivača transformatorske stanice, i nazad ka izvoru. Deo struje kvara koji se odvodi preko uzemljivača podiže njegov potencijal i potencijal okolnog zemljišta u odnosu na udaljenu referentnu zemlju. Kao posledica povišenog potencijala uzemljivača transformatorske stanice i okolnog zemljišta, postoji opasnost od prenošenja tih potencijala na objekte u njegovoj blizini. Preneti potencijali se mogu javiti u okolnim stambenim objektima, i ugroziti instalacije niskog napona u samom objektu, kao i drugim tehničkim sistemima, kao što su telekomunikacioni vodovi i gasovodi. Posledica toga su moguće pojave previsokih vrednosti napona dodira i napona koraka unutar i u neposrednoj okolini samog objekta, eventualnog proboja izolacije niskonaponskih električnih instalacija i, zavisno od primenjenog sistema zaštite od napona dodira u objektu, iznošenje ovih potencijala u niskonaponsku mrežu preko neutralnog provodnika mreže ukoliko je on uzemljen u samom objektu. U radu su analizirani navedeni uticaji i data je ocena rizika od izloženosti naponu dodira i koraka i ocena rizika za instalacije u objektu.

2 MODELOVANJE

2.1 Proračun struje koja se odvodi kroz uzemljivač

Na slici 1 prikazana je opšta šema raspodele struje zemljospoja u transformatorskoj stanici.



Slika 1: Opšta šema raspodele struje kvara, za slučaj zemljospoja u transformatorskoj stanici

Sa $I_{(1)A}$ i $I_{(1)B}$ označene su struje koje u mesto kvara dotiču po vodovima, a sa $I_{(1)T}$ struja koja sa strane transformatora utiče u mesto kvara. Sa I_N je označena struja koja teče kroz zvezdište transformatora. Deo struje kvara koji dolazi po vodu se odvodi preko zaštitnog užeta usled magnetne sprege koja postoji između faze pogođene kvarom i zaštitnog užeta i usled efekta stubova voda kao uzemljivača. Sa I_u je označen deo struje kvara koji se odvodi u tlo sa uzemljivača transformatorske stanice čiji je otpor rasprostiranja R .

U šemi je sa $I_{(1)}$ označena ukupna struja kvara, R označava otpor uzemljenja transformatorske stanice, sa Z_{AL} i Z_{BL} su označene ekvivalentne impedanse zaštitnih užadi koje obuhvataju uzemljivački uticaj stubova dalekovoda, a sa r_A i r_B njihovi redukcionni faktori. Struja I_e se odvodi preko tla i ne može se direktno meriti. Iz šeme na slici 1 se dobija sledeća jednačina:

$$\underline{I}_e = \underline{r}_A \cdot \underline{I}_{(1)A} + \underline{r}_B \cdot \underline{I}_{(1)B} \quad (1)$$

Struja koja otiče u tlo sa uzemljivača transformatorske stanice jednaka je:

$$\underline{I}_u = D_f \cdot \underline{I}_e \cdot \frac{\underline{Z}_e}{R} \quad (2)$$

gde je sa D_f označen faktor kojim se uzima u obzir uticaj jednosmerne komponente struje kvara i vreme trajanja kvara t_k . Ako sa T_{ae} označimo vremensku konstantu prigušenja jednosmerne komponente, posmatrano sa mesta kvara, faktor D_f se računa iz izraza:

$$D_f = \sqrt{1 + \frac{T_{ae}}{t_k} \cdot \left[1 - e^{\left(-\frac{2 \cdot t_k}{T_{ae}} \right)} \right]} \quad (3)$$

Ekvivalentna impedansa sistema uzemljenja $\underline{Z}_e$ se izračunava iz sledećeg izraza:

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{\underline{Z}_{AL}} + \frac{1}{\underline{Z}_{BL}} \right)^{-1} \quad (4)$$

Izrazi se mogu uopštiti za proizvoljan broj nadzemnih vodova i kablova sa metalnim plaštom. Struja $\underline{I}_u$ u opštem slučaju je data sledećom jednačinom:

$$\underline{I}_u = D_f \cdot \left(\sum_k \underline{I}_{(1)k} \cdot \underline{r}_k \right) \cdot \frac{\underline{Z}_e}{R} \quad (5)$$

gde je:

$$\underline{Z}_e = \left(\frac{1}{R} + \sum_k \frac{1}{\underline{Z}_k} \right)^{-1} \quad (6)$$

Indeks k obuhvata sve vodove i kablove koji ulaze u postrojenje a deluju kao uzemljivači. Sa $\underline{Z}_k$ su označene njihove impedanse uzemljenja, a sa $\underline{r}_k$ njihovi redukcionni faktori.

2.2 Proračun parametara u ekvivalentnoj šemi

Sopstvena impedansa zaštitne užadi sa povratnim putem struje preko zemlje iznosi:

$$\underline{Z} = 0,05 + R_1 + j \cdot \left(0,1445 \cdot \log_{10} \frac{D}{r_e} + 0,016 \cdot \mu_r \right) \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (7)$$

gde su:

R_1 – aktivna otpornost užeta na 1 km dužine;

r_e – poluprečnik užeta;

μ_r – relativni magnetni permeabilitet užeta;

D – prividna dubina povratnih puteva struje kroz tlo, koji se izračunava na osnovu sledećeg izraza:

$$D = 658 \cdot \left(\frac{\rho}{f}\right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

gde je ρ specifična električna otpornost tla.

Međusobna impedansa faznih provodnika sa zaštitnim provodnikom iznosi:

$$\underline{Z}_m = 0,05 + j \cdot 0,1445 \cdot \log_{10} \frac{D}{d_m} \left[\frac{\Omega}{km} \right] \quad (9)$$

pri čemu je sa d_m označeno srednje geometrijsko rastojanje faza od zaštitnog provodnika.

Redukcioni faktor voda je jednak:

$$\underline{r} = 1 - \frac{\underline{Z}_m}{\underline{Z}} \quad (10)$$

Ekvivalentna impedansa uzemljenja zaštitnog užeta voda jednaka je:

$$\underline{Z}_L = \frac{\underline{Z} \cdot L_{rasp}}{2} + \sqrt{\underline{Z} \cdot L_{rasp} \cdot R_S} \quad (11)$$

gde je sa L_{rasp} označena prosečna dužina raspona u km, a R_S prosečna vrednost otpora uzemljenja stubova na celoj trasi.

2.3 Proračun raspodele potencijala, napona dodira i koraka

Raspodela potencijala na površini tla u okolini transformatorske stanice izračunava se primenom računarskog softverskog alata. Na osnovu raspodele potencijala na površini tla određuju se vrednosti potencijalnih razlika dodira i koraka, a iz njih i vrednosti napona dodira i koraka. Napon dodira je:

$$U_d = \frac{E_d}{1 + 1,5 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p} \quad (12)$$

gde je: E_d potencijalna razlika dodira koja se određuje iz raspodele potencijala oko transformatorske stanice, a ρ_p specifična električna otpornost površinskog sloja tla. Napon koraka se određuje primenom sledećeg izraza:

$$U_k = \frac{E_k}{1 + 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_p} \quad (13)$$

u kome je sa E_k označena najveća potencijalna razlika koja se na tlu oko transformatorske stanice može premostiti korakom dužine 1 m, koja se određuje iz raspodele potencijala na površini tla u okolini transformatorske stanice.

Da bi uslovi u pogledu bezbednosti bili ispunjeni potrebno je da proračunati naponi dodira i koraka budu manji od dozvoljenih vrednosti. Dozvoljeni napon U_{doz} definisan je Pravilnikom [1] i zavisi isključivo od vremena trajanja kvara:

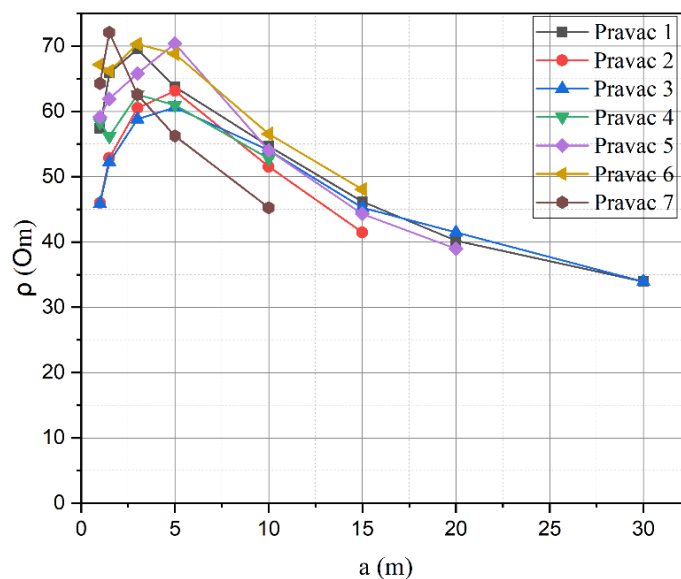
$$\begin{aligned} U_{doz} &= 1000 \text{ V}, t \leq 0.075 \text{ s} \\ U_{doz} &= \frac{75}{t} \text{ V}, 0.075 \text{ s} \leq t \leq 1.153 \text{ s} \\ U_{doz} &= 65 \text{ V}, t > 1.153 \text{ s} \end{aligned} \quad (14)$$

2.4 Modelovanje zemljišta

U cilju određivanja galvanskih uticaja uzemljivača transformatorske stanice na uzemljivač stambenog objekta, neophodno je usvojiti parametre zemljišta u kome su uzemljivači postavljeni. U tu svrhu izvršena su ispitivanja specifične električne otpornosti tla na lokacijama u blizini transformatorske stanice i lokacije objekta. Ispitivanje specifične električne otpornosti tla izvršeno je geoelektričnim sondiranjem, po metodi Wenner-a, sa simetričnim rasporedom četiri elektrode [2]. Razmak između mernih elektroda (oznaka „a”) je postepeno povećavan u koracima $a = 1 \text{ m}$; $1,5 \text{ m}$; 3 m ; 5 m ; 10 m ; 15 m ; 20 m и 30 m , tako da je u svakoj tački sondiranja izvršeno po nekoliko merenja. Povećavanjem rastojanja elektroda povećava se i dubina mernog zahvata. Geoelektričnim sondiranjem ispitan je specifični otpor dubljih slojeva tla. Ispitivanje je sprovedeno u 7 tačaka sondiranja. Za svaku izmerenu vrednost otpornosti $R [\Omega]$ i rastojanja sonde $a [\text{m}]$ izračunava se odgovarajuća vrednost prividne specifične električne otpornosti tla $\rho [\Omega\text{m}]$:

$$\rho = 2 \cdot \pi \cdot a \cdot R \quad (15)$$

Uporedni prikaz rezultata dobijenih u svim tačkama sondiranja prikazan je na slici 2.



Slika 2: Uporedni prikaz rezultata prividne specifične električne otpornosti tla

U cilju dobijanja kritičnih vrednosti galvanskih uticaja, u proračunima su analizirana dva slučaja modela tla. U prvom slučaju je usvojen model jednoslojnog tla, dok je u drugom slučaju usvojen model dvoslojnog tla [3]. Interpretacijom rezultata merenja, u slučaju jednoslojnog modela tla, dobijene su vrednosti specifične električne otpornosti tla. Za dvoslojni model tla dobijene su vrednosti specifične električne otpornosti gornjeg (ρ_1) i donjeg (ρ_2) sloja tla, kao i debljina gornjeg sloja tla (h). S obzirom na činjenicu da se kritične vrednosti galvanskih uticaja dobijaju za veće vrednosti specifične električne otpornosti, za jednoslojni model tla usvojena je vrednost dobijena za pravac S6, dok su za dvoslojni model usvojene vrednosti parametara dobijene za pravac S7. Vrednosti parametara za oba modela tla pregledno su date u tabeli 1.

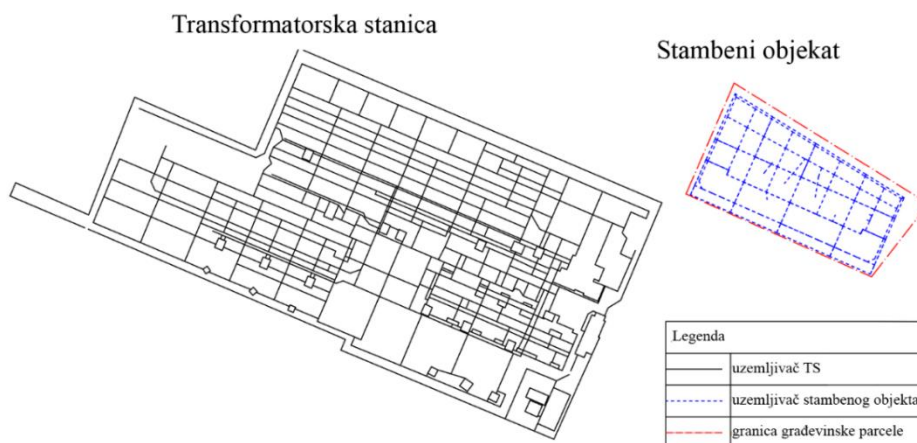
Tabela 1: Vrednosti parametara jednoslojnog i dvoslojnog modela tla

Model	Jednoslojni	Dvoslojni
ρ_1 [Ωm]	62,8	73,2
ρ_2 [Ωm]	/	41,4
h [m]	/	2,65

3 REZULTATI PRORAČUNA

3.1 Proračun raspodele potencijala i struje koja se odvodi kroz uzemljivač

Za izračunavanje potencijala tla u okolini transformatorske stanice prilikom zemljospoja, neophodno je odrediti vrednost komponente struje zemljospoja koja se odvodi sa uzemljivača transformatorske stanice. Na osnovu ove struje i formiranog modela uzemljivača transformatorske stanice i stambenog objekta, moguće je proračunati vrednosti napona dodira i koraka, kao i vrednosti prenetog potencijala na uzemljivač stambenog objekta, prilikom zemljospoja u transformatorskoj stanici. Međusobni položaj uzemljivača transformatorske stanice i stambenog objekta prikazan je na slici 3.



Slika 3: Uzemljivač transformatorske stanice i stambenog objekta

Podaci o struji zemljospoja i vremenu trajanja zemljospoja dati su u tabeli 2.

Tabela 2: Podaci o struji i trajanju zemljospoja

t [s]	I_z [kA]
0,15	23,66

Podaci o dalekovodima, koji su korišćeni u proračunima, dati su u tabeli 3. U tabeli 3 je za svaki dalekovod data prosečna dužina raspona, ukupan broj stubova na trasi dalekovoda, broj i tip zaštitnog užeta i karakteristike zaštitnog užeta. Podaci o dalekovodima su korišćeni prilikom proračuna redukcionog faktora i ekvivalentne impedanse uzemljenja zaštitnog užeta dalekovoda.

Tabela 3: Podaci o dalekovodima

Redni broj	Dužina prosečnog raspona [m]	Broj stubova	Tip zaštitnog zaštitnog užeta	Poluprečnik užeta [mm]	Otpornost užeta $\left[\frac{\Omega}{km}\right]$	Redukcioni faktor $ r $
1.	318	86	OPGW тип В	7,5	0,358	0,74
2.	292	94	2 x AWG 126,1 mm ²	7,25	0,6821	0,70
3.	231	16	AWG 126,1 mm ²	7,25	0,6821	0,82
4.	213	38	OPGW тип D	5	1,315	0,89
5.	213	36	Če 50 mm ²	4,5	4,672	0,94
6.	242	33	2 x AWG 126,1 mm ²	7,25	0,6821	0,68

S obzirom na činjenicu da je struja kvara data za perspektivno stanje mreže, u proračunima je uvaženo prisustvo budućih planiranih nadzemnih i kablovskih vodova. Zbog nedostupnosti podataka o budućim visokonaponskim dalekovodima, za redukcioni faktor svih vodova je usvojena srednja vrednost 0,8.

Za prosečnu vrednost otpornosti rasprostiranja uzemljivača stubova duž trase dalekovoda usvojena je vrednost od 5 Ω .

Na osnovu vremena trajanja kvara, maksimalno dozvoljena vrednost napona dodira i koraka se izračunava na osnovu izraza (14):

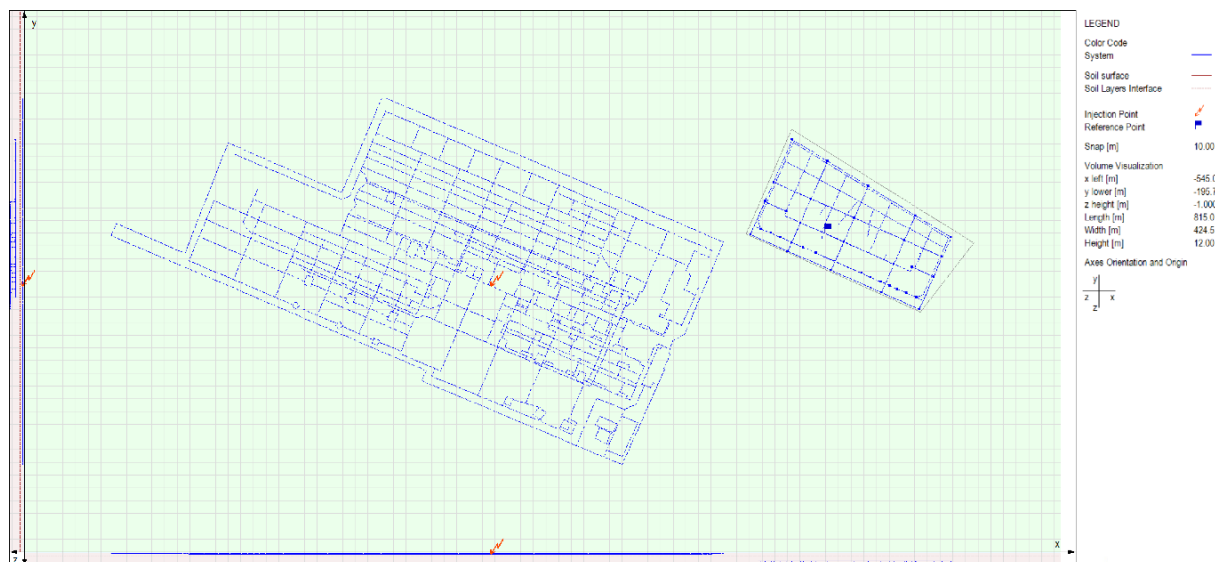
$$U_d = 500 V \quad (16)$$

Za usvojene vrednosti parametara jednoslojnog i dvoslojnog tla izračunate su vrednosti dozvoljene potencijalne razlike dodira i koraka koje su date u tabeli 4 za oba modela tla.

Tabela 4: Potencijalne razlike dodira i koraka

Model	Jednoslojni	Dvoslojni
$E_{ddoz}[V]$	547,1	554,9
$E_{kdoz}[V]$	688,4	719,6

Uzemljivač transformatorske stanice izveden je od bakarnog užeta preseka 120 mm², položenog u zemlju na dubini od 0,8 m. Spoljašnja ograda nije povezana sa uzemljivačem transformatorske stanice, već se povezuje sa sopstvenim uzemljivačkim prstenom koji je položen oko nje. Uzemljivač spoljašnje ograde izveden je od bakarnog užeta preseka 120 mm², položen je u zemlju na dubini od 0,5 m i postavljen je na rastojanju od 1 m sa spoljašnje strane ograde. Uzemljivač stambenog objekta izveden je kao temeljni uzemljivač od pocinkovane čelične trake Fe/Zn 30 x 4 mm² i Fe/Zn 25 x 4 mm². Model uzemljivača formiran u računarskom softverskom alatu prikazan je na slici 4.



Slika 4: Uzemljivač transformatorske stanice i stambenog objekta

Otpornosti rasprostiranja uzemljivača transformatorske stanice i uzemljivača stambenog objekta, za jednoslojno i dvoslojno tlo, prikazane su u tabeli 5.

Tabela 5: Otpornost rasprostiranja uzemljivača transformatorske stanice i stambenog objekta

Objekat	Otpornost rasprostiranja uzemljivača [Ω]	
	Jednoslojni model	Dvoslojni model
Transformatorska stanica	0,0977	0,08841
Stambeni objekat	0,2598	0,1791

Za dobijene vrednosti otpornosti rasprostiranja uzemljivača transformatorske stanice izračunate su vrednosti struje koja se odvodi sa uzemljivača, prema izrazu (5). U tabeli 6 su date struje koje se odvođe sa uzemljivača transformatorske stanice, za model jednoslojnog i dvoslojnog tla.

Tabela 6: Vrednost struje koja se odvodi sa uzemljivača transformatorske stanice

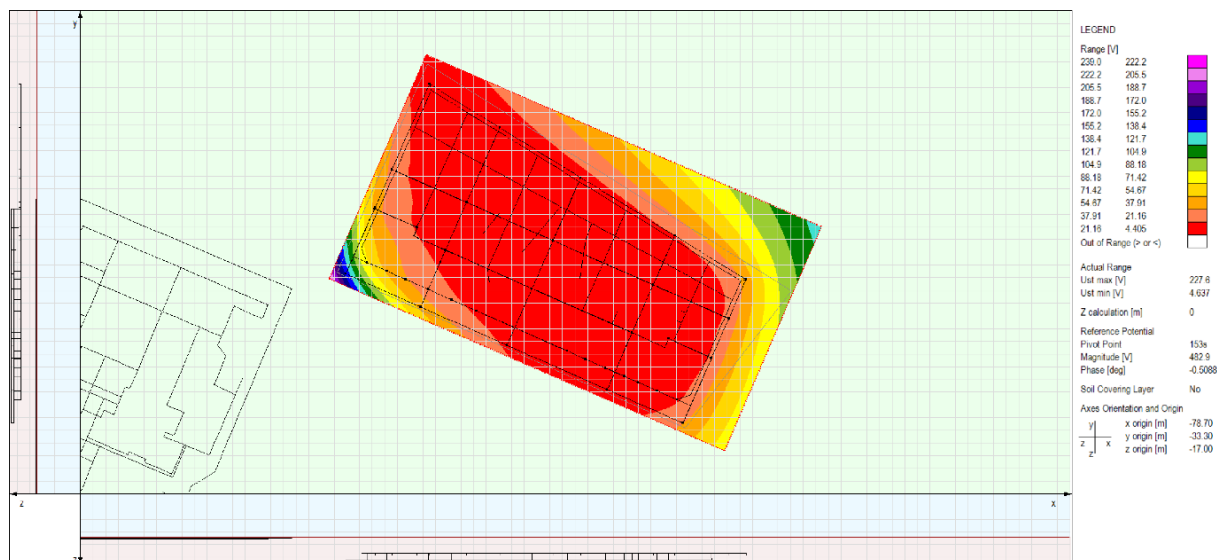
Model	Jednoslojni	Dvoslojni
I_u [kA]	13,05	14,43

3.2 Proračun napona dodira i koraka

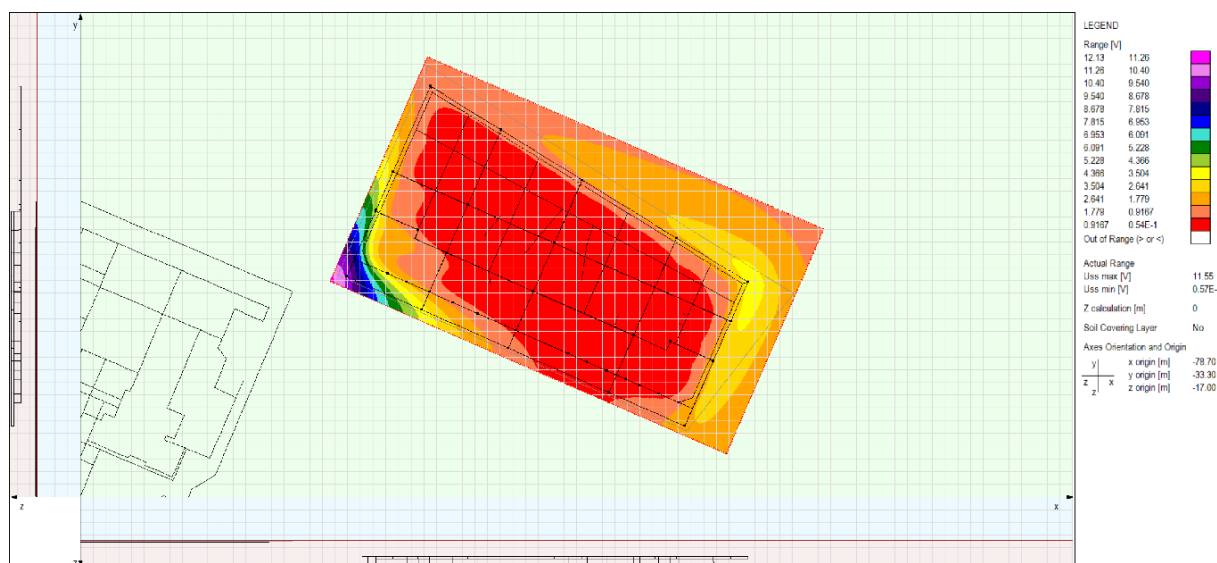
Na osnovu modela uzemljivača, kao i struje koja se odvodi sa uzemljivača, izračunava se raspodela potencijala na površini tla oko transformatorske stanice, naponi dodira i naponi koraka, primenom računarskog softverskog alata. Maksimalne vrednosti potencijalne razlike dodira i koraka na području stambenog objekta usled iznetog potencijala na uzemljivač objekta, za slučaj zemljospoja u transformatorskoj stanici, date su u tabeli 7. Vrednosti su proračunate za oba modela tla. Raspodele napona dodira i koraka na području stambenog objekta, za slučaj jednoslojnog tla, prikazane su na slikama 5 i 6.

Tabela 7: Maksimalne vrednosti potencijalne razlike dodira i koraka

Model	Jednoslojni	Dvoslojni
$E_{dmax}[V]$	228	160
$E_{kmax}[V]$	12	8



Slika 5: Raspodela potencijalne razlike dodira na području stambenog objekta



Slika 6: Raspodela potencijalne razlike koraka na području stambenog objekta

Proračunate vrednosti potencijalne razlike dodira i koraka, koje se javljaju na području stambenog objekta usled iznetog potencijala prilikom zemljospoja u transformatorskoj stanici, su ispod propisanih vrednosti, za oba usvojena modela tla. Maksimalna vrednosti potencijalne razlike dodira iznosi 228 V, i to za model jednoslojnog tla. Dobijena vrednost je manja od propisane granice od 547 V.

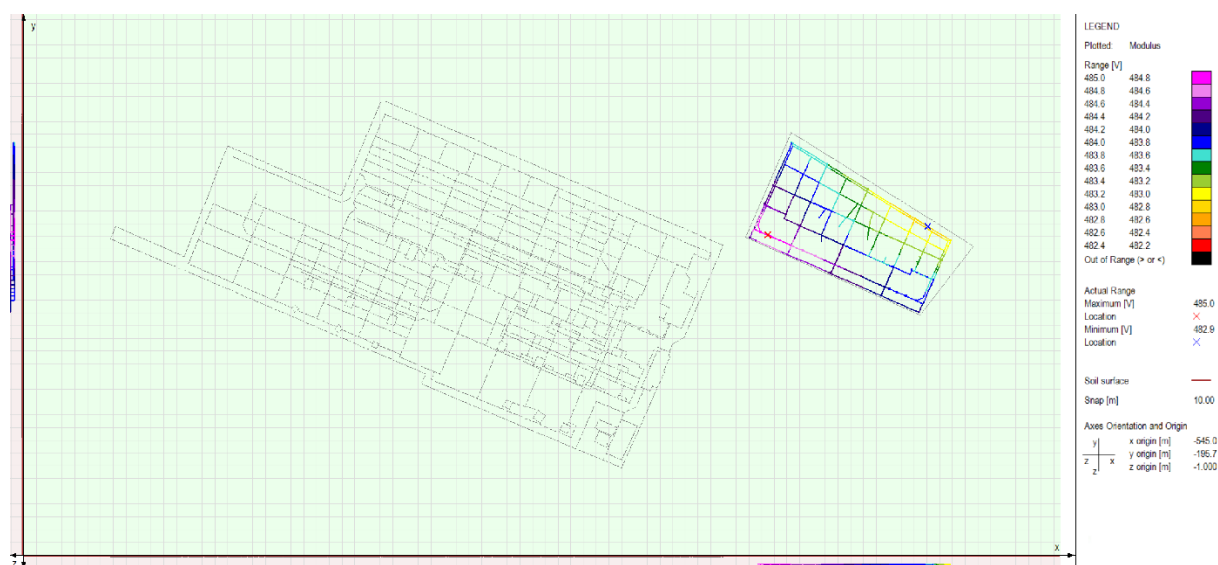
Sa stanovišta mogućeg proboja izolacije u niskonaponskim instalacijama, za granicu do koje se sme dozvoliti porast potencijala može se, sa dovoljnom rezervom u pogledu sigurnosti, usvojiti vrednost od 1200 V [4].

U tabeli 8 date su proračunate vrednosti potencijala, na koji dolazi uzemljivač stambenog objekta u odnosu na referentnu zemlju, prilikom zemljospoja u transformatorskoj stanici.

Tabela 8: Proračunate vrednosti potencijala na koji dolazi uzemljivač stambenog objekta

Model	Jednoslojni	Dvoslojni
$V_{max}[V]$	485	354

Vrednosti su proračunate za oba modela. Na slici 7 dat je prikaz raspodele potencijala uzemljivača stambenog objekta, za slučaj jednoslojnog tla. Maksimalna vrednost potencijala na koji dolazi uzemljivač stambenog objekta iznosi 485 V, i to za model jednoslojnog tla. Dobijena vrednost je manja od granice od 1200 V. Na osnovu proračunatih vrednosti datih u tabeli 8, zaključuje se da ne postoji rizik od proboja izolacije električne instalacije niskog napona, pri zemljospoju u transformatorskoj stanici, za uslove kvara date u tabeli 2.



Slika 7: Raspodela potencijala uzemljivača stambenog objekta, prilikom zemljospoja u transformatorskoj stanici, za jednoslojni model tla

4 ZAKLJUČAK

U radu je analiziran rizik od izloženosti ljudi naponima dodira i koraka koji se mogu pojaviti na lokaciji stambenog objekta u slučaju zemljospoja u transformatorskoj stanici. Takođe je analiziran i rizik od proboja izolacije električne instalacije niskog napona kod potrošača u stambenom objektu. Analiza je pokazala da su vrednosti napona dodira i napona koraka u propisanim granicama i da ne postoji rizik od proboja izolacije električne instalacije niskog napona.

5 LITERATURA

- [1] Pravilnik o tehničkim normativima za uzemljenja elektroenergetskih postrojenja nazivnog napona iznad 1000 V, Sl. list SRJ br. 61/95.
- [2] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System, IEEE Standard 81-2012.

- [3] Maja Grbić, Dragutin Salamon, Aleksandar Pavlović: „Interpretacija rezultata geoelektričnog sondiranja zasnovana na matematičkom modelu dvoslojnog tla”, Zbornik radova, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla”, Beograd, 2013. godina, knjiga 23, str. 189–198, ISSN 0350-8528, UDK: 621.316.99:537.311.3, DOI: 10.5937/zeint23-4544.
- [4] SRPS EN 50522:2017 „Uzemljenje energetskih postrojenja naizmeničnog napona preko 1 kV”.
- [5] Aleksandar Pavlović, Stefan Obradović, Maja Grbić, Ranko Jasika: „Rizik od proboja izolacije električne instalacije niskog napona pri zemljospoju na stubu nadzemnog voda”, 36. savetovanje CIGRE Srbija, Srpski nacionalni komitet Međunarodnog saveta za elektroenergetiku, Zlatibor, Republika Srbija, 22–26. 5. 2023. godine, Zbornik radova, R C4 12, STK C4 – Tehničke performanse EES.