

## Analiza frekvencijske zavisnosti specifične električne otpornosti tla – metoda merenja i praktična primena

VOJIN I. KOSTIĆ, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, Beograd

ŽARKO S. JANDA, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, Beograd

ZORAN B. NEDELJKOVIĆ, JP “Elektromreža Srbije”, Beograd

Originalni naučni rad

UDC: 621.317.33

*Prilikom projektovanja sistema uzemljenja prvi korak predstavlja utvrđivanje vrednosti specifičnog električnog otpora tla. Merenje specifične električne otpornosti tla, obavlja se pre izvođačkih radova na lokaciji budućeg elektroenergetskog objekta. Međutim, nije redak slučaj da se tokom izgradnje objekta vrši naknadno nivelisanje i podizanje nivoa tla. U tu svrhu uobičajeno je da se koristi zemljište sa drugih lokacija. Dopremljeno zemljište ima, uglavnom, drugačije elektromagnetske karakteristike (specifična električna provodnost, permitivnost i dielektrična konstanta) u odnosu na zemljište na kome je prethodno sprovedeno merenje specifične električne otpornosti, a to je ulazni podatak odgovarajuće projektne dokumentacije. Pošto vrednost specifične električne otpornosti tla direktno utiče na električne parametre sistema uzemljenja – na impedansu sistema uzemljenja, na napon dodira i na napon koraka – neophodna su dodatna merenja i odgovarajuće korekcije izvedenog rešenja sistema uzemljenja.*

*U ovom radu predložen je metod za relativno jednostavno merenje specifične električne otpornosti tla. Metoda je primenjiva kako u fazi projektovanja sistema uzemljenja, tako i za potrebe revizije izvedenog sistema. Na praktičnom primeru, na bazi laboratorijskog merenja specifične električne otpornosti uzoraka tla dopremljenog sa lokaliteta elektroenergetskog objekta (RP 400 kV Mladost, Elektromreža Srbije) i obližnje oranice, jasno je pokazano kakve posledice ima nasipanje terena sa šljakom.*

**Glavne riječi:** specifična električna otpornost, merna metoda, laboratorijski uslovi

### 1. UVOD

Mrežasti uzemljivač je najčešće korišćeni tip uzemljivača u transformatorskim stanicama i razvodnim postrojenjima najvišeg pogonskog napona. Mrežasti uzemljivač se sastoji od horizontalno položenih neizolovanih (golih) provodnika, postavljenih na dubini 0.5 m - 1 m, koji su povezani međusobno kao i sa vertikalno pobodenim sondama postavljenim na krajevima pravougaone konture. Pošto je mrežasti uzemljivač položen u tlu, na njegove karakteristike utiče značajan broj različitih faktora kao što su: tip zemljišta (glina, pesak, tucanik, kamen), vlažnost zemljišta, temperatura zemljišta i sezonski uticaji (dubinsko zamrzavanje i isušivanje tla). Dakle, za potrebe adekvatnog projektovanja sistema uzemljenja, razumevanje elektromagnetskih karakteristika tla (specifična električna otpornost, permitivnost i dielektrična konstanta) je od suštinskog značaja [1].

Sa druge strane, opšte je poznata činjenica da promene specifične električne otpornosti tla direktno utiču na bezbednosne parametre sistema uzemljenja – na vrednost impedanse sistema uzemljenja, na napon dodira i na napon koraka [2]. Zadovoljenje uslova u pogledu bezbednosti definitivno se potvrđuje merenjima.

Pre početka izgradnje elektroenergetskog objekta vrši se merenje specifične električne otpornosti tla. Merenje se uobičajeno sprovodi primenom Venerove (Wenner) metode sa četiri sonde [3-4]. Praktično ograničenje ove metode ogleda se u činjenici da se ista može primeniti samo pre instalacije mrežastog uzemljivača. Nakon instalacije uzemljivačkih provodnika, isti utiču na rezultate merenja i dovode do oprečnih zaključaka. Problem nastaje, kada se nakon sprovođenja merenja specifične električne otpornosti tla, u toku izgradnje elektroenergetskog objekta, nivelacija tla vrši dopremanjem zemljišta sa drugih lokaliteta. Zemljište se doprema sa ciljem podizanja nivoa tla elektroenergetskog objekta, kako bi se postigle bezbednosne visine faznih provodnika nadzemnih vodova i ujedno smanjili ugibi na istim. Navedeno je izuzetno važno i u slučajevima kada nadzemni vodovi prelaze iznad stambenih objekata i moraju se sprovesti mere

Adresa autora: Vojin Kostić, Elektrotehnički institut “Nikola Tesla”, Beograd, Koste Glavinića 8a

Rad primljen: 22.12.2014.

Rad prihvaćen: 19.02.2015.

ograničenja nivoa nejonizujućih zračenja u istim. Nivo dopremljenog zemljišta može dosegnuti visinu i do 5 m. U tom slučaju, horizontalni uzemljivački provodnici, položeni na dubini od oko 0.5 m (uobičajeno), zajedno sa vertikalno pobodenim sondama (tipične dužine 4 m), nalaze se u tlu drugačijih elektromagnetskih karakteristika od onih za osnovno (nenasuto) zemljište.

Problem nastaje kada, zbog neblagovremene revizije, postoji značajna razlika u pogledu elektromagnetskih karakteristika u izvedenom rešenju na nasutom tlu u odnosu na elektromagnetske karakteristike osnovnog tla koje su navedene i korišćene u projektnoj dokumentaciji za sistem uzemljenja. Kao što je već navedeno, ispunjenje bezbednosnih zahteva potvrđuje se merenjima. Najvažniji parametar preko koga se ispitivanjima mogu kvantifikovati performanse sistema uzemljenja je impedansa sistema uzemljenja. Značajno je napomenuti, da je vrednost impedanse sistema uzemljenja, tačnije njenog aktivnog dela (rezistivnosti), direktno proporcionalna vrednosti specifične električne otpornosti tla u kome je uzemljivač položen [5].

Ispitivanja impedanse sistema uzemljenja su od suštinskog značaja, jer vrednost impedanse sistema uzemljenja određuje ukupni potencijal na koji dolazi uzemljivač prilikom kvara, kao i raspodelu potencijala unutar i izvan zaštitne ograde elektroenergetskog objekta. Sama ispitivanja se najčešće sprovode injektiranjem struje u ispitivani sistem uzemljenja, što za cilj ima simulaciju uslova kvara i podizanje uzemljivača na određeni potencijal.

Odvođenje injektirane struje sa uzemljivača se u ruralnim područjima odvija kroz okolno zemljište (medijum) u kome su položeni provodnici uzemljivača, ali u urbanim gradskim sredinama sa razvijenim elektroenergetskim (kablovska mreža visokog i srednjeg napona), i drugim podzemnim instalacijama (cevovodi, toplovodi) problem odvođenja struje sa uzemljivača zahteva mnogo složeniji model, što prevazilazi sadržaj ovoga rada.

U dimenziono velikim elektroenergetskim objektima najvišeg pogonskog napona, zbog značajnog prisustva elektromagnetske interferencije i naponskih smetnji, ispitivanja impedanse sistema uzemljenja neretko se sprovode alternativnim metodama [6-9]. Jedna od alternativnih metoda ispitivanja je i metoda pomerene frekvencije (MPF), koja je opisana i elaborirana u [10-11].

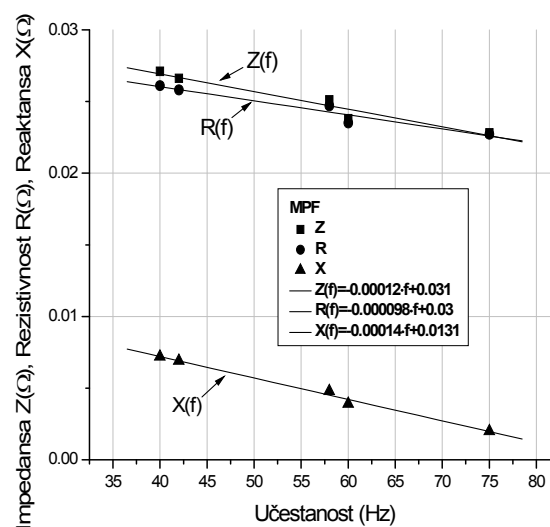
Metoda se sastoji u korišćenju ispitne struje čija je učestanost pomećena u odnosu na industrijsku, tj. u odnosu na 50 Hz. Empirijski je utvrđeno [10 - 11] da je pogodan opseg učestanosti između 40 Hz i 75 Hz.

Dodatni benefit MPF ogleda se u određivanju faznog stava impedanse, tačnije određivanju njene rezistivnosti i reaktanse.

Interesantno je da karakter zavisnosti impedanse sistema uzemljenja od učestanosti u različitim elektroenergetskim objektima nije isti – u ruralnim područjima, bez razgranate mreže podzemnih instalacija i izlazećih kablovskih vodova visokog i srednjeg napona, impedansa sistema uzemljenja opada sa porastom učestanosti (rezultati ispitivanja MPF iz 5 elektroenergetskih objekata), dok u urbanim gradskim zonama i elektroenergetskim objektima sa razvijenom kablovskom mrežom raste sa porastom učestanosti (ispitivanja sprovedena u 15 elektroenergetskih objekata koristeći MPF).

Autori osnovano pretpostavljaju, da je osnovni uzrok, za opisano ponašanje frekvencijske zavisnosti impedanse sistema uzemljenja, vezano za elektromagnetske specifičnosti osnovnog tla ili nasutog zemljišta prilikom izgradnje elektroenergetskog objekta, ali i prisustva drugih metalnih masa u zemljištu (strujno-opteretivi plaševi kablova razgranate kablovske mreže srednjeg i visokog napona, toplovodi, cevovodi, armirano-betonske temeljne konstrukcije zgrada) koje ostvaruju direktnu ili posrednu galvansku vezu sa ispitivanim sistemom uzemljenja, tako da se u tim slučajevima ne odvodi sva struja sa uzemljivača kroz okolnu zemlju u kojoj je uzemljivač položen.

Osnovni cilj ovog rada je da se izuči i verifikuje način za precizno utvrđivanje vrednosti specifične električne otpornosti tla (na učestanosti 50 Hz), na lokalitetima na kojima je već instaliran uzemljivački sistem, a elektroenergetski objekat je u normalnom pogonskom stanju.

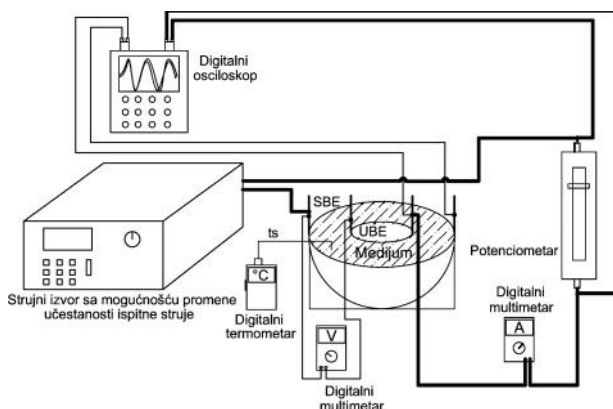


Slika 1 - Frekvencijska zavisnost impedanse sistema uzemljenja (Z), rezistivnosti (R) i reaktanse (X) po MPF u RP 400 kV „Mladost“

U tom kontekstu biće opisana laboratorijska merenja specifične električne otpornosti tla na uzorcima zemljišta uzetih sa dubine polaganja uzemljivača (oko 0.6 m) u RP 400 kV „Mladost“, (Elektromreža Srbije, Obrenovac), kao i sa obližnje oranice. Kako je prilikom ispitivanja sistema uzemljenja, u navedenom elektroenergetskom objektu (slika 1, ruralno područje), vrednost impedanse sistema uzemljenja opadala sa porastom učestanosti ispitne struje, u radu je takođe prikazana i analiza frekvencijske zavisnosti uzoraka tla (dopremljenog i osnovnog) u uskom frekvencijskom opsegu učestanosti između 40 Hz i 75 Hz, što odgovara MPF.

## 2. POSTUPAK MERENJA

Ispitna šema za laboratorijsko merenje specifične električne otpornosti uzoraka tla prikazana je na slici 2. Merni sistem se sastoji od dve polusferne bakarne elektrode čiji unutrašnji poluprečnik iznosi 4.7 cm (UBE), a spoljašnji poluprečnik iznosi 10.1 cm (SBE). Provodnici strujnog ispitnog kola označeni su punom debelom linijom, dok su provodnici naponskog ispitnog kola označeni punom tankom linijom. Provodnik i sonda digitalnog termometra, koji služi za merenje temperature uzorka zemljišta prilikom ispitivanja, označeni su na slici 2 sa ts.



Slika 2 - Ispitno kolo za merenje specifične električne otpornosti tla u laboratorijskim uslovima

Ispitna struja,  $I_i$ , dobija se iz frekvencijski agilnog izvora (California Instruments, tip 5001iM) i teče, između polusfernih bakarnih elektroda uronjenih u provodni medijum (uzorak tla). Ispitne učestanosti su: 40, 42, 58, 60 i 75 Hz. Zahvaljujući polusfernom obliku elektroda induktivni efekat se može zanemariti. Vrednost ispitne struje očitava se sa digitalnog multimetra redno povezanog u strujnom ispitnom kolu. Signal ispitne struje posmatra se na digitalnom osciloskopu, posredno, preko vrednosti napona na potenciometru (500  $\Omega$ ), redno povezanom u strujnom ispitnom kolu. Potenciometar ujedno ograničava i vrednost ispitne struje  $I_i$ . Pad napona,  $U_i$ , očitava se na odgovarajućem digitalnom multimetru. Na digitalnom

osciloskopu posmatra se i signal u naponskom ispitnom kolu. Signali napona i struje posmatraju se pomoću digitalnog osciloskopa, da bi se zbog prisustva bakrovog oksida ( $Cu_2O$ ) kontrolisao fazni pomak između  $U_i$  i  $I_i$ . Tokom naše merne kampanje, fazni pomak između  $U_i$  i  $I_i$  nije registrovan. Merenje temperature medijuma (zbog eventualnog zagrevavanja prilikom ispitivanja) vrši se pomoću digitalnog termometra. Temperatura se meri i zapisuje pre i nakon završetka merenja.

Impedansa provodnog medijuma izračunava se iz izraza:

$$Z = R = \frac{U_i}{I_i}, X = 0 \quad (1)$$

Izraz (1) važi ako su  $U_i$  i  $I_i$  u fazi.

Sa druge strane, električna otpornost mernog sistema sa slike 2 je prema [12]

$$R = \frac{\rho}{2 \cdot \pi} \cdot \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right) \quad (2)$$

gde je:  $\rho$  – vrednost specifične električne otpornosti medijuma,  $a$  – poluprečnik unutrašnje elektrode mernog sistema (u razmatranom slučaju je  $a = 4.7$  cm) i  $b$  – poluprečnik spoljašnje elektrode mernog sistema (u razmatranom slučaju je  $b = 10.1$  cm).

Iz izraza (1) i (2) sledi:

$$\rho = \frac{2 \cdot \pi \cdot U_i}{I_i \cdot \left( \frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)} = 0.552 \cdot \frac{U_i}{I_i} \quad (3)$$

Baždarenje mernog sistema, slika 3, obavljeno je merenjem specifične električne otpornosti slane vode (3.5% masenih NaCl na 1l destilovane vode, na temperaturi 21.4°C).



Slika 3 – Prikaz baždarenja mernog sistema

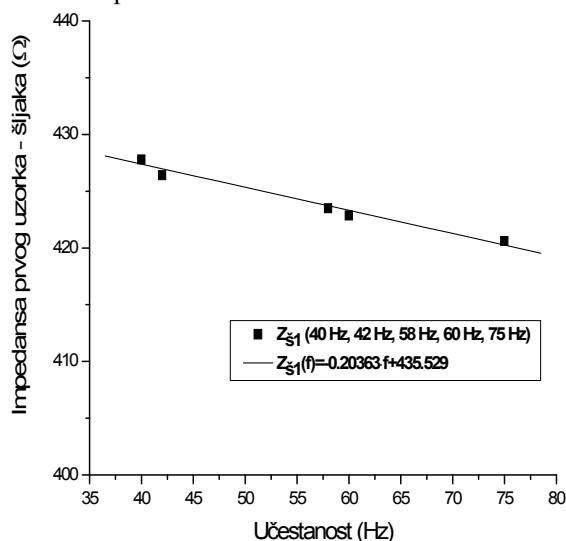
Izmerena vrednost iznosi 0.653  $\Omega \cdot m$  (50 Hz) i poklapa se sa vrednostima navedenim literaturi i u standardu IEEE 81-2012 [3].

Procesiranje mernih rezultata je kao u slučaju MPF [10 - 11]. Rezultati ispitivanja predstavljaju se grafički.

Potom, primenom linearne regresije generiše se regresiona prava. Konačno, za  $f=50$  Hz sa regresione prave očitava se vrednost impedanse provodnog medijuma.

### 3. REZULTATI ISPITIVANJA

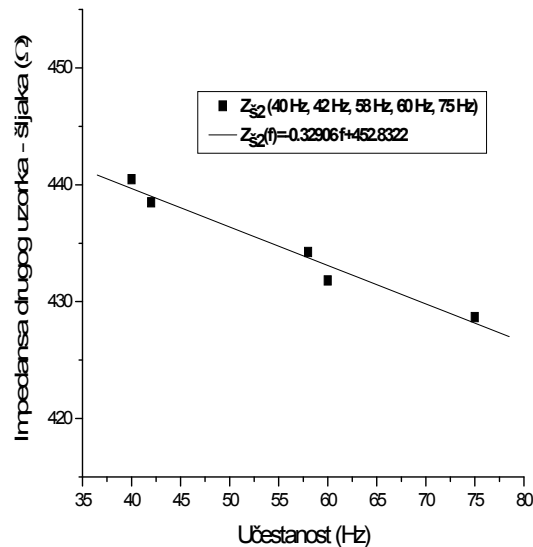
Osnovna specifičnost RP 400 Kv "Mladost", sastoji se u tome što je objekat izgrađen na nasutoj podlozi. Visina nasipanja je oko 5 m iznad nivoa osnovnog tla. Nasipanje je izvršeno dopremanjem šljake sa obližnje deponije pepela Termoelektrane "Nikola Tesla - A" u Obrenovcu. Mrežasti uzemljivač objekta (bakarna užad preseka  $150 \text{ mm}^2$  ukopana na dubini 0.5 m i vertikalni uzemljivači – cevi FeZn 2.5''x4 m) u potpunosti su u nasipu od šljake. Pošto postoji opravdana sumnja da se vrednost specifične električne otpornosti nasutog sloja zemljišta (šljake) značajno razlikuje od vrednosti usvojene projektnom dokumentacijom, bilo je potrebno uzeti uzorke i iste ispitati u laboratorijskim uslovima. Uzorci su uzeti u dve prostorno razvojene tačke unutar ograde razvodnog postrojenja, sa dubine polaganja uzemljivača (oko 0.6 m). Rezultati ispitivanja prikazani su na slikama 4 i 5, respektivno. Da bi se utvrdio uticaj nasute šljake na izmenu vrednosti impedanse tla analiziran je i uzorak zemljišta sa obližnje oranice (sa dubine 0.6 m), a što odgovara karakteristikama osnovnog nenasutog tla. Rezultati su prikazani na slici 6.



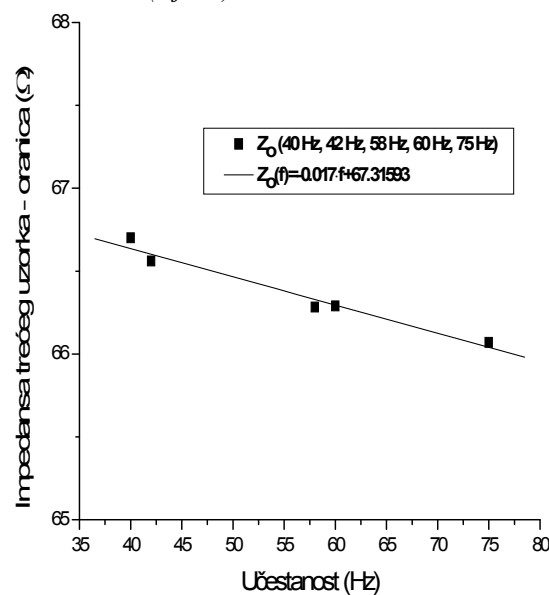
Slika 4 – Frekvencijska zavisnost impedanse prvog uzorka (šljake)

Konsultujući sliku 1 i slike 4 do 6 može se uočiti da su regresione prave opadajuće sa sličnim nagibom. Vrednosti specifične električne otpornosti šljake, dobijene na osnovu linearne regresije na učestanosti 50 Hz, u prostorno razdvojenim tačkama iznose  $425.4 \Omega \cdot \text{m}$  odnosno  $436.4 \Omega \cdot \text{m}$ , respektivno (relativno odstupanje je 2.5%). Vrednost specifične električne otpornosti oranice je  $66.5 \Omega \cdot \text{m}$ , i sedam puta je niža od specifične električne otpornosti šljake.

Prilikom ispitivanja specifične električne otpornosti uzoraka tla temperatura tokom merenja nije se menjala (iste vrednosti su zabeležene na početku i na kraju merenja) i iznosila je  $18.9^\circ\text{C}$ ,  $18.7^\circ\text{C}$  i  $19.1^\circ\text{C}$ , za prvi, drugi i treći uzorak, respektivno.



Slika 5 – Frekvencijska zavisnost impedanse drugog uzorka (šljake)



Slika 6 – Frekvencijska zavisnost impedanse trećeg uzorka (oranica)

### 4. ZAKLJUČAK

U radu je prikazana alternativna metoda za određivanje vrednosti specifične električne otpornosti provodnog medijuma u laboratorijskim uslovima. Uzimanjem uzoraka tla sa dubine polaganja uzemljivača, može se odrediti vrednost specifične električne otpornosti medijuma u koji je položen uzemljivač. Za dva različita uzorka tla istih elektromagnetskih karakteristika (slike 4 i 5) relativno odstupanje iznosi 2.5% (za

praksu zanemarivo). Sa druge strane, relativno odstupanje specifične električne otpornosti oranice (osnovno tlo) u odnosu na šljaku (dopremljeno zemljište) iznosi 556% (slike 5 i 6).

Takođe je potvrđena i polazna premisa autora, da frekvencijska zavisnost impedanse sistema uzemljenja, u čisto ruralnom području, „prati“ frekvencijsku zavisnost provodnog medijuma u kome je uzemljivač položen.

## 5. ZAHVALNICA

Posebnu zahvalnost autori duguju JP “Elektromreža Srbije”, jer je na osnovu ugovora<sup>1</sup> sa Elektrotehničkim institutom „Nikola Tesla” finansirala izradu studije pod nazivom „Analiza stanja i predlog mera za sanaciju uzemljivačkih sistema transformatorskih stanica 220 kV/X kV i 400 kV/X kV”. Rad na pomenutoj studiji i rešavanje odgovarajućih problema bio je i motiv za ovaj rad.

## LITERATURA

- [1] J. A. Kong, Progress in Electromagnetis Research, Volume 1, Elsevier Science Publishing Co., Inc, 1989.
- [2] J. He, R. Zeng, Y. Gao, Y. Tu, W. Sun, J. Zou, and Z. Guan, Seasonal Influences on Safety of Substation Grounding System, IEEE Trans. Power Delivery, 18(3), 788-795, 2003.
- [3] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Standard 81-2012, Dec. 2012.
- [4] EN 50522, Earthing of power installations exceeding 1 kV a.c., Nov. 2010.
- [5] J. Nahman, V. Mijailović „Odabrana poglavlja iz visokonaponskih postrojenja”, Akademsko misao, Beograd, 2002.
- [6] W. C. Boaventura, I. J. S. Lopes, P. S. A. Rocha, R. M. Coutinho, F. Castro Jr, and F. C. Dart, Testing and Evaluating Grounding Systems of High Voltage Energized Substations: Alternative Approaches, IEEE Trans. Power Delivery, 14 (3), 923-927, 1999.
- [7] H. Griffiths, P. Jones, N. Harid, and A. Haddad, Proposal for Measurement of Earth Impedance Using Variable Frequency Injection, Meas. Sci. Technol., 21(8), 085102 (8pp), 2010.
- [8] R. Zeng, J. He, and Z. Guan, Novel Measurement System for Grounding Impedance of Substation, IEEE Trans. Power Delivery, 21(2), 719-725, 2006.
- [9] V. Kostić, D. Salamon, A. Pavlović, S. Milić „Poboljšanje U-I metode za merenje impedanse sistema uzemljenja”, Međunarodna konferencija Elektrane 2012.
- [10] V. Kostić, N. Raičević, and A. Pavlović, Enhanced Grounding System Impedance Measurements for High-Voltage Substations, International Trans. Electrical Energy Systems, 2014., doi: 10.1002/etep.1939.
- [11] V. Kostić, S. Rebrić, D. Kovačević, N. Raičević „Ispitivanje impedanse sistema uzemljenja dimenzioniranih velikih elektroenergetskih objekata najvišeg pogonskog napona metodom pomerene frekvencije”, Međunarodna konferencija Elektrane 2014.
- [12] J. Surutka „Elektromagnetika”, četvrto izdanje, Građevinska knjiga, Beograd, 1975.

<sup>1</sup> Ugovor broj U-928 od 9. oktobra 2013. godine

## SUMMARY

### ANALYSIS OF EARTH RESISTIVITY FREQUENCY DEPENDANCE – TEST METHOD AND ITS PRACTICAL APPLICATION

*The first step in planning and designing of the proper grounding system, is the earth resistivity measurement. Measurements are carried out before the construction of the power facility. However, it is not an uncommon situation that during construction, subsequent leveling and raising of the ground level is performed. For this purpose, it is customary to use the land from the locations far away. Delivered soil has largely different electromagnetic characteristics (electric conductivity, permittivity and dielectric constant) in relation to the soil on which the previous measurement of the earth resistivity was conducted. Since the value of the earth resistivity directly affects the grounding system electrical parameters – grounding system impedance, touch and step voltages - additional measurements are required and according to this appropriate corrections of the grounding system*

*In this paper, we propose a practical method for earth resistivity measurement. The method is applicable in the design phase, and also for the revision of the installed grounding system. A practical example of a power facility (RP 400 kV Mladost, Elektromreža Srbije), based on laboratory measurements of the soil samples earth resistivity and grounding system impedance measurement, clearly shows what consequences might occur by leveling and raising of the ground level using ash coal dump.*

**Key words:** *earth resistivity, test method, laboratory conditions*