

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ ЕЛЕКТРОТЕХНИЧКОГ ФАКУЛТЕТА У БЕОГРАДУ

На 744. седници Наставно-научног већа Електротехничког факултета у Београду, одржаној 06.03.2012. године, одређени смо за чланове Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације мр Јована Трифуновића под насловом „Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача“. Након прегледа добијеног материјала, Наставно-научном већу Електротехничког факултета подносимо следећи

### ИЗВЕШТАЈ

#### ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ

Јован Трифуновић је рођен 15.02.1979. године у Београду. Основну школу и гимназију завршио је у Смедереву. Електротехнички факултет у Београду (Енергетски одсек) уписао је 1997. године. Дипломирао је 2003. године на смеру Електроенергетски системи, са просечном оценом 8,68 (награђен од стране Електротехничког факултета као студент који је са највећом просечном оценом дипломирао на Енергетском одсеку школске 2002/03. године). Постдипломске студије на Електротехничком факултету у Београду, смер Алтернативни извори енергије, уписао је 2003. године, положио све испите са просечном оценом 10, и 2009. године одбранио магистарску тезу под насловом „Технички, економски и еколошки фактори који утичу на дефинисање оптималне стратегије за масовно увођење компактних флуоресцентних извора светлости у Србији“.

Од 2003. године био је ангажован на Електротехничком факултету у Београду, најпре као истраживач-стипендиста на пројектима Министарства науке и заштите животне средине „Импулсна плазма – технолошки и еколошки напредак у производњи“ и „Систем за контролу и управљање јавном расветом“. Од 01.09.2005. године ради као асистент-приправник (од 08.09.2009. године као асистент) на Катедри за енергетске претвараче и погоне. Учествоје у извођењу рачунских и лабораторијских вежби из предмета: Електроенергетске инсталације ниског напона, Електричне инсталације ниског напона 2, Електротермија и Термички процеси у електроенергетици. У претходним годинама учествовао је у реализацији великог броја научноистраживачких и стручних пројеката. У току досадашњег рада мр Јован Трифуновић је објавио 3 рада у водећим међународним часописима са SCI листе, 3 рада на међународним конференцијама и 5 радова на домаћим конференцијама. Као резултат истраживања у оквиру предложене теме до сада су послата два рада часописима са SCI листе:

1. J. Trifunovic, M. Kostic, "Analysis of influence of imperfect contact between grounding electrodes and surrounding soil on electrical properties of grounding loops", послат у часопис Electrical Engineering 13.07.2011, и
2. J. Trifunovic, "An analytical research on characteristics of backfill materials used for reduction of grounding resistance of grounding loops", послат у часопис Journal of Electrical Engineering–Elektrotechnicky Casopis 15.12.2011.

## ПРЕДМЕТ И ЦИЉ ИСТРАЖИВАЊА

Главни предмет истраживања у овој дисертацији представља развој методе за прорачун отпорности распростирања контурних уземљивача помоћу које би могао да се уважи утицај несавршеног контакта између електрода и околног тла. У доступним домаћим и страним стандардима и научно-стручној литератури не постоје нити методе, нити упрошћени аналитички изрази, за прорачуне отпорности распростирања уземљивача помоћу којих би се тај утицај уважио. Међутим, постоје научни радови у којима су приказани резултати експеримената који показују значајну несагласност између измерених вредности отпорности распростирања уземљивача и вредности израчунатих применом стандардних формула. У једном од таквих радова презентовани су резултати мерења отпорности распростирања квадратних контурних уземљивача (како класичних, тако и са слојевима различитих додатних материјала), положених у двослојно тло код кога је горњи слој, у коме су уземљивачи положени, карактерисала структура која је у великој мери онемогућавала добар контакт са електродама уземљивача.

У циљу анализе резултата експеримента, иста експериментална поставка ће бити 3Д моделована применом методе коначних елемената. На основу резултата великог броја рачунарских симулација које ће бити спроведене на 3Д моделу, биће анализиран и објашњен утицај лошег контакта између електрода контурног уземљивача и околног тла, и то како на његову отпорност распростирања, тако и на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Циљ анализе биће развој методе и предлагање упрошћених израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распростирања разматраног контурног уземљивача. Развијена метода треба да буде лако применљива и на друге типове уземљивача.

Осим наведеног, на основу резултата великог броја рачунарских симулација које ће бити спроведене на 3Д моделу, биће анализирани и објашњени утицаји како специфичне електричне отпорности додатног материјала и његове количине, тако и побољшања контакта услед постављања додатног материјала између околног тла и електрода контурног уземљивача, на његову отпорност распростирања. Циљ те анализе биће формирање јасних смерница о томе како израчунати оптималну количину оваквог додатног материјала, као и о томе која карактеристика оваквог материјала је кључна за успешно смањење компоненте контактне отпорности.

Развијена метода и предложени упрошћени изрази помоћу којих треба да се уважи утицај несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распростирања разматраног контурног уземљивача, као и смерница о томе како израчунати оптималну количину додатног материјала који треба да се употреби при инсталирању таквог уземљивача, биће употребљени за пројектовање оптималног типичног уземљивача реалног далеководног стуба. Биће спроведена техно-економска анализа у оквиру које ће се поредити цене класичног уземљивача и оног код кога је употребљен додатни материјал за смањење контактне отпорности. Пошто класичан типичан уземљивач далеководног стуба представља комбинацију квадратних контурних уземљивача, посебна пажња биће посвећена утицају несавршеног контакта између електрода и околног тла на вредности коефицијената којима се описује међусобни утицај појединачних контура. Неколико различитих типова уземљивача типичног реалног далеководног стуба биће 3Д моделовано применом методе коначних елемената. На основу резултата рачунарских симулација које ће бити спроведене на тако формираним 3Д моделима биће анализиран, објашњен и квантитативно представљен утицај лошег контакта између електрода и околног тла на вредности коефицијената којима се

описује међусобни утицај контура. Циљ анализе биће развој методе и предлагање упрошћених израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распрострања уземљивача типичног реалног далеководног стуба. Верификација развијене методе извршиће се експериментом који ће бити спроведен на умањеном моделу у лабораторији. Због своје општости, предложени начин пројектовања оптималног уземљивача типичног реалног далеководног стуба, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, моћи ће да се употреби и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

### ***Осврт на релевантне библиографске изворе***

У референцама 1–14 дате су методе и упрошћени аналитички изрази за прорачуне отпорности распрострања уземљивача различитих конфигурација, положених у тла различите структуре. Употреба додатног материјала за смањење контактне отпорности, са свим пропратним техно-економским ефектима, разматрана је у референцама 15–28. Општа теорија о развоју и примени методе коначних елемената дата је у референцама 29–32. Начини примене методе коначних елемената на прорачуне електричних карактеристика уземљивача изложени су у референцама 33–39.

- [1] V. Brandenbursky, A. Farber, V. Korj, A. Braunshtein, “Ground resistance calculation for small concrete foundations”, *Electric Power Systems Research* 81 (2011) 408–413.
- [2] J.K. Choi, Y.H. Ahn, J.W. Woo, G.J. Jung, B.S. Han, K.C. Kim, “Evaluation of grounding performance of energized substation by ground current measurement”, *Electric Power Systems Research* 77 (2007) 1490–1494.
- [3] M.M.A. Salama, M.M. Elsherbiny, Y.L. Chow, K.C. Kim, “Calculation and interpretation of a grounding grid in two-layer earth with the synthetic-asymptote approach”, *Electric Power Systems Research* 35 (1995) 157–165.
- [4] E. Mombello, O. Trad, J. Rivera, A. Andreoni, “Two-layer soil model for power station grounding system calculation considering multilayer soil stratification”, *Electric Power Systems Research* 37 (1996) 67–78.
- [5] Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std. 80, 1986.
- [6] Guide for Safety in AC Substation Grounding, ANSI/IEEE Std. 80, 2000.
- [7] M.B. Kostic, B.D. Popovic, M.S. Jovanovic, “Numerical analysis of a class of foundation grounding systems”, *IEE Proceedings C, Generation, Transmission and Distribution* 137 (1990) 123–128.
- [8] M.B. Kostic, “Analysis of foundation grounding systems with external loops and rods”, *IEE Proceedings C, Generation, Transmission and Distribution* 140 (1993) 73–76.
- [9] M.B. Kostic, “Parametric analysis of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil”, *IEEE Transactions on Power Delivery* 9 (1994) 1406–1411.
- [10] M.B. Kostic, G.H. Shirkoochi, “Numerical analysis of a class of foundation grounding systems surrounded by two-layer soil”, *IEEE Transactions on Power Delivery* 8 (1993) 1080–1087.
- [11] M.B. Kostic, “Analysis of complex grounding systems consisting of foundation grounding systems with external grids”, *IEEE Transactions on Power Delivery* 13 (1998) 752–756.
- [12] J. Nahman, S. Skuletic, “Resistances to ground and mesh voltages of ground grids”, *Proceedings of the Institution of Electrical Engineers* 126 (1979) 57–61.

- [13] Y.L. Chow, M.M. Elshabiny, M.M.A. Salama, "A fast and accurate analysis of grounding resistance of a driven rod in a two-layer soil", *IEEE Transactions on Power Delivery* 11 (1996) 808–814.
- [14] B. Thapar, O. Ferrer, D.A. Blank, "Ground resistance of concrete foundations in substations yards", *IEEE Transactions on Power Delivery* 5 (1990) 130–136.
- [15] M.B. Kostic, Z.R. Radakovic, N.S. Radovanovic, M.R. Tomasevic-Canovic, "Improvement of electrical properties of grounding loops by using bentonite and waste drilling mud", *IEE Proceedings C, Generation, Transmission and Distribution* 146 (1999) 1–6.
- [16] W.R. Jones, "Bentonite rods assure ground rod installation in problem soils", *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems PAS-99* (1980) 1343–1346.
- [17] Z.R. Radakovic, M.B. Kostic, "Behaviour of grounding loop with bentonite during a ground fault at an overhead line tower", *IEE Proceedings C, Generation, Transmission and Distribution* 148 (2001) 275–278.
- [18] M. Veledar, Z. Timic, S. Skok, Z. First, "Improvement of grounding properties by using bentonite", *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, 1982 Session, Paris, France, 22-06.
- [19] H. Kutter, W. Lange, "Grounding improvement by using bentonite", *Elektrie*, 21 (1967) 421–424.
- [20] J. Jasni, L.K. Siow, M.Z.A. Ab Kadir, W.F. Wan Ahmad, "Natural materials as grounding filler for lightning protection system", *30th International Conference on Lightning Protection - ICLP 2010* (Cagliari, Italy - September 13th–17th, 2010).
- [21] N. Kumarasinghe, "A low cost lightning protection system and its effectiveness", *20th International Lightning Detection Conference*, Tucson, Arizona, April, 2008.
- [22] G. Eduful, J.E. Cole, P.Y. Okyere, "Optimum mix of ground electrodes and conductive backfills to achieve a low ground resistance", *2nd International Conference on Adaptive Science & Technology*, Accra, Ghana, 14-16 Jan. 2009, pp. 140-145.
- [23] L.H. Chen, J.F. Chen, T.J. Liang, W.I. Wang, "A study of grounding resistance reduction agent using granulated blast furnace slag", *IEEE Transactions on Power Delivery* 19 (2004) 973–978.
- [24] S.D. Chen, L.H. Chen, C.K. Cheng, J.F. Chen, "An experimental study on the electrical properties of fly ash in the grounding system", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, (2006) Vol. 7: Iss. 2, Article 7.
- [25] Q. Meng, J. He, F.P. Dawalibi, J. Ma, "A new method to decrease ground resistances of substation grounding systems in high resistivity regions", *IEEE Transactions on Power Delivery* 14 (1999) 911–916.
- [26] L.H. Chen, J.F. Chen, T.J. Liang, W.I. Wang, "A research on used quantity of ground resistance reduction agent for ground systems", *European Transactions on Electrical Power* 20 (2010) 408–421.
- [27] H.E. Martínez, E.L. Fuentealba, L.A. Cisternas, H.R. Galleguillos, J.F. Kasaneva, O.A. De La Fuente, "A new artificial treatment for the reduction of resistance in ground electrode", *IEEE Transactions on Power Delivery* 19 (2004) 601–608.
- [28] A.A. Al-Arainy, N.H. Malik, M.I. Qureshi, Y. Khan, "Grounding pit optimization using low resistivity materials for applications in high resistivity soils", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, (2011) Vol. 12: Iss.1, Article 3.
- [29] J. Jin, "The finite element method in electromagnetics", John Wiley & Sons, New York, 2002.

- [30] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor and J.Z. Zhu, "The Finite Element Method: Its Basis and Fundamentals", Elsevier Butterworth-Heinemann, Oxford, 2005.
- [31] P.P. Silvester, R.L. Ferrari, "Finite elements for electrical engineers", Cambridge University Press, 1996.
- [32] O.C. Zienkiewicz, C. Emson, P. Bettess, "A novel boundary infinite element", International Journal for Numerical Methods in Engineering 19 (1983) 393–404.
- [33] I. Colominas, J. Gomez-Calvino, F. Navarrina, M. Casteleiro, "A general numerical model for grounding analysis in layered soils", Advances in Engineering Software 33 (2002) 641–649.
- [34] J. Nahman, I. Paunovic, "Resistance to earth of earthing grids buried in multi-layer soil", Electrical Engineering 88 (2006) 281–287.
- [35] J.A. Güemes, F.E. Hernando, "Method for calculating the ground resistance of grounding grids using FEM", IEEE Transactions on Power Delivery 19 (2004) 595–600.
- [36] J.A. Güemes-Alonso, F.E. Hernando-Fernández, F. Rodríguez-Bona, J.M. Ruiz-Moll, "A practical approach for determining the ground resistance of grounding grids", IEEE Transactions on Power Delivery 21 (2006) 1261–1266.
- [37] Colominas I, Navarrina F, Casteleiro M. "A boundary element numerical approach for grounding grid computation", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering 174 (1999) 73–90.
- [38] J. Nahman, I. Paunovic, "Effects of the local soil nonuniformity upon performances of ground grids", IEEE Transactions on Power Delivery 22 (2007) 2180–2184.
- [39] J. Nahman, I. Paunovic, "Mesh voltages at earthing grids buried in multi-layer soil", Electric Power Systems Research 80 (2010) 556–561.

## ПОЛАЗНЕ ХИПОТЕЗЕ

У раду се полази од хипотезе да је применом софистицираних софтверских алата могуће моделовати уземљиваче положене у тло у коме није остварен савршен контакт између електрода и околног тла. Очекује се да ће на основу анализе резултата великог броја рачунарских симулација које ће бити спроведене на 3Д моделу бити могуће објашњење утицаја лошег контакта између електрода контурног уземљивача и околног тла на његову отпорност распростирања, као и развој методе за прорачун отпорности распростирања уземљивача помоћу које би тај утицај могао да се уважи. Следећи корак је предлагање упрошћених израза помоћу којих треба да се уважи утицај несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распростирања разматраног контурног уземљивача. Очекује се да је могуће формирати комплекснију методу за пројектовање оптималног уземљивача типичног реалног далеководног стуба, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, која ће моћи да се употреби и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

## НАУЧНЕ МЕТОДЕ ИСТРАЖИВАЊА

Описана експериментална поставка са квадратним контурним уземљивачима, као и уземљивачи реалног 110kV далеководног стуба, биће 3Д моделовани применом методе коначних елемената (Finite Element Method – FEM). За моделовање уземљивача и нумеричке прорачуне отпорности распростирања и расподеле потенцијала у околном тлу, биће коришћен

софтвер COMSOL Multiphysics. Несавршен контакт ће бити моделован „постављањем“ ваздушних цепова између електрода и околног тла. На основу резултата великог броја рачунарских симулација које ће бити спроведене на 3Д моделима, биће анализиран утицај броја, величине и диспозиције ваздушних цепова, и то како на отпорност распростирања квадратног контурног уземљивача, тако и на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Кроз анализе резултата прорачуна биће утврђене корелације између параметара помоћу којих ће се описивати квалитет оствареног контакта између електрода и околног тла и отпорности распростирања разматраних уземљивача. Те корелације ће бити описане изразима који ће се добити обрадом резултата прорачуна која ће се извршити применом методе најмањих квадрата (користиће се софтвери Matlab и Excel). На сличан начин биће анализирани и објашњени утицаји како специфичне електричне отпорности додатног материјала и његове употребљене количине, тако и побољшања контакта услед постављања додатног материјала, на отпорност распростирања контурног уземљивача. Верификација развијене методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распростирања уземљивача типичног реалног далеководног стуба извршиће се експериментом који ће бити спроведен на умањеном моделу у лабораторији. Одређивање оптималног уземљивача типичног реалног далеководног стуба, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, биће засновано на техно-економској анализи у оквиру које ће се поредити цене класичног уземљивача и оног код кога је употребљен додатни материјал.

## **ОЧЕКИВАНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

У оквиру предложене докторске дисертације очекују се следећи научни доприноси:

- Метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распростирања разматраног контурног уземљивача, која ће бити лако применљива и на друге типове уземљивача;
- Смернице о томе како израчунати оптималну количину додатног материјала, као и о томе која карактеристика таквог материјала је кључна за успешно смањење компоненте контактне отпорности;
- Метода за пројектовање оптималног уземљивача типичног реалног далеководног стуба, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, која ће моћи да се употреби и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

## **ПЛАН ИСТРАЖИВАЊА И СТРУКТУРА РАДА**

У оквиру предложене докторске дисертације, након уводног поглавља са прегледом области, биће описано 3Д моделовање квадратних контурних уземљивача из референце 15, положених у двослојно тло код кога је горњи слој, у коме су уземљивачи положени, карактерисала структура која је у великој мери онемогућавала добар контакт са електродама уземљивача (3Д моделовање извршиће се применом методе коначних елемената). На основу добијених резултата, у наредном делу рада биће анализиран и објашњен утицај лошег контакта између електрода контурног уземљивача и околног тла и представљена метода за

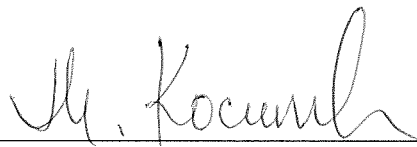
уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача. У делу који следи биће анализирани и објашњени утицаји како специфичне електричне отпорности додатног материјала и његове количине, тако и побољшања контакта услед постављања додатног материјала између околног тла и електрода контурног уземљивача, на његову отпорност распрострања. Након тога, биће приказан начин пројектовања уземљивача типичног реалног далеководног стуба, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности. У наредном делу рада биће приказани резултати експеримента који ће, у циљу верификације развијене методе, бити спроведен на умањеном моделу у лабораторији. У следећем поглављу ће се представити техно-економска анализа која треба да омогући одређивање оптималног уземљивача типичног реалног далеководног стуба. Закључна разматрања ће бити изложена у завршном поглављу.

### ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

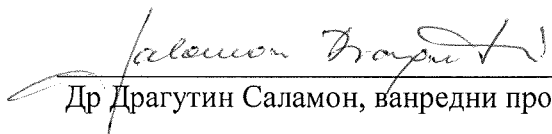
На основу изложеног, Комисија констатује да кандидат испуњава све формалне и суштинске услове за приступање изради докторске дисертације, као и да је предложена тема „Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача“ научно актуелна у домену теорије и праксе пројектовања уземљивача. Зато Комисија предлаже Научно-наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату мр Јовану Трифуновићу одобри израду докторске дисертације са наведеним насловом.

У Београду, 04.04.2012. године

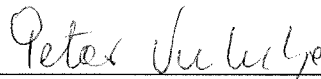
Комисија:



Др Миомир Костић, редовни професор



Др Драгутин Саламон, ванредни професор



Др Петар Вукелја, научни саветник  
(Институт „Никола Тесла“)