

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата мр Јована Трифуновића

Одлуком Наставно-научног већа Електротехничког факултета донетом на седници бр. 793 одржаној 10.11.2015. године (бр. одлуке 894/3 од 17.11.2015. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата мр Јована Трифуновића под насловом

„Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача”

После прегледа достављене дисертације и других пратећих материјала и разговора са кандидатом, Комисија је сачинила следећи

РЕФЕРАТ

1. УВОД

1.1. Хронологија одобравања и израде дисертације

- 16.01.2009. године, на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, кандидат мр Јован Трифуновић одбранио је магистарски рад под насловом „Технички, економски и еколошки фактори који утичу на дефинисање оптималне стратегије за масовно увођење компактних флуоресцентних извора светлости у Србији“;
- 21.02.2012. године кандидат мр Јован Трифуновић пријавио је тему за израду докторске дисертације под насловом „Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача“;
- 01.03.2012. године Комисија за студије III степена разматрала је предлог наведене теме за израду докторске дисертације и предлог Комисије о оцени подобности теме и кандидата упутила Наставно-научном већу на усвајање;
- 06.03.2012. године Наставно-научно веће је именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације;
- 24.04.2012. године Наставно-научно веће је усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације;
- 04.06.2012. године Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације под насловом „Методологија за уважавање несавршеног контакта

између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача” (број одлуке 06-18938/19-12 од 04.06.2012. године);

– 22.10.2015. године предата је докторска дисертација на преглед и оцену;

– 03.11.2015. године Комисија за студије III степена потврдила је испуњеност потребних услова за подношење предлога Наставно-научном већу Електротехничког факултета за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације;

– на седници бр. 793, одржаној 10.11.2015. године (бр. одлуке 894/3 од 17.11.2015. године), Наставно-научно веће Факултета именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације у следећем саставу:

др Миомир Костић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Зоран Радаковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Драгутин Саламон, ванредни професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет,

др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет и

др Милан Илић, ванредни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата мр Јована Трифуновића припада научној области Техничке науке -Електротехника, ужа научна област Електроенергетика. За ментора дисертације одређен је др Миомир Костић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због истакнутих научних и стручних доприноса у области Електроенергетике, а посебно у ужој области пројектовања уземљивача, којом се бави предметна дисертација.

1.3. Биографски 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 (школске 2002/03. године, од стране Електротехничког факултета награђен је као студент који је дипломирао са највећом просечном оценом на Енергетском одсеку). 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“. Рад на докторској дисертацији на Електротехничком факултету у Београду започео је 2010. године, а 2012. године прихваћена му је тема докторске дисертације под насловом „Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача“. Стручни испит за област Енергетска ефикасност зграда положио је 2014. године.

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, а од 25.09.2015. године као виши лабораторијски инжењер) на катедри за Енергетске претвараче и погоне. Учествује у извођењу рачунских и лабораторијских вежби из предмета: Електроенергетске инсталације ниског напона, Електричне инсталације ниског напона 2, Електротермија и Термички процеси у електроенергетици. Претходних година је учествовао у реализацији великог броја научноистраживачких и стручних пројеката и аутор/коаутор је двадесет три објављена научна рада и два техничка решења.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под насловом „Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача“ написана је на српском језику, ћириличним писмом, на 167 страна и садржи 75 слика и 16 табела. Подељена је на девет поглавља: 1) Увод; 2) 3Д FEM моделовање квадратних контурних уземљивача; 3) Анализа утицаја лошег контакта између електрода и околног тла на електричне карактеристике разматраног класичног квадратног контурног уземљивача; 4) Анализа утицаја додатног материјала на отпорност распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача; 5) Израда упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура; 6) Алгоритам за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексних уземљивачких система уз уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла; 7) Експериментална верификација; 8) Методологија за одређивање оптималног уземљивача у условима несавршеног контакта између електрода и околног тла; 9) Закључци. У списку коришћене литературе налази се 95 референци које детаљно приказују тренутно стање у области пројектовања уземљивача.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У уводном поглављу је истакнута неопходност развоја метода и упрошћених аналитичких израза за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система који се врши приликом њиховог пројектовања. Такође је истакнуто да није увек лако постићи стандардима захтевану отпорност распрострања уземљивачког система, нарочито уколико је уземљивач положен у тло велике специфичне отпорности и/или уколико тло формира лош контакт са електродама. Наглашено је да се у таквим случајевима у пракси користе разни додатни материјали који се постављају између електрода и тла са циљем елиминације контактне отпорности и смањења укупне отпорности распрострања уземљивачког система. На основу расположиве литературе и података, дат је кратак преглед стандардних метода за прорачун отпорности распрострања уземљивачких система и истакнута немогућност њихове употребе у условима како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и при употреби додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача. Наглашено је да су развој методе коначних елемената (*finite element method* – FEM), пратећих софтвера и перформанси рачунара, омогућили 3Д моделовање малих запремина разних облика и физичких карактеристика у непосредној близини површине уземљивачких електрода, што је представљало предуслов за успешно спровођење детаљне анализе проблема несавршеног контакта између електрода и тла и употребе разних додатних материјала. Објашњено је да су сви алгоритми и методе за развијање упрошћених израза који су представљени у дисертацији базирани на 3Д FEM моделовању и нумеричкој анализи

добијених резултата. Они су неопходни за пројектовање оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном реалном уземљивачу далеководног стуба), са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, а могу се употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

Друго поглавље обрађује поступак формирања 3Д FEM модела разматраних квадратних контурних уземљивача третираних у једној од наведених референци и објашњава поступак прорачуна релевантних електричних карактеристика уземљивача који се у оквиру рачунарске симулације спроводи над формираним 3Д FEM моделом. У овом поглављу су дефинисане вредности свих улазних параметара неопходних за формирање 3Д FEM модела разматраних квадратних контурних уземљивача. Такође, описан је поступак моделовања како несавршеног контакта, тако и додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача, а дефинисани су и сви параметри помоћу којих се описују њихове карактеристике у оквиру 3Д FEM модела.

Анализа утицаја лошег контакта између електрода и околног тла на електричне карактеристике разматраног класичног квадратног контурног уземљивача извршена је у трећем поглављу. Прво су представљени резултати мерења отпорности распрострања квадратних контурних уземљивача из разматране референце, на основу којих је показано колики проблем може да представља контактна отпорност. Њиховим поређењем са резултатима добијеним 3Д FEM симулацијама потврђено је да је 3Д FEM моделовање проблема разматраних у дисертацији добро урађено и да су улазни параметри прорачуна добро одређени у разматраној референци. Након тога, представљене су отпорности распрострања разматраног класичног квадратног контурног уземљивача добијене 3Д FEM симулацијама за разне вредности параметара којима се описује несавршен контакт између електрода уземљивача и околног тла. Анализом резултата је показано да је удео оног дела површине уземљивача који је покривен ваздушним џеповима (који не остварује контакт са околним тлом) параметар који најзначајније утиче на повећање контактне отпорности, а тиме и на повећање укупне отпорности распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача. У наставку поглавља, на основу резултата добијених 3Д FEM симулацијама (електричних потенцијала у свакој тачки запремине 3Д модела), разматран је утицај несавршеног контакта на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Утврђено је да структура материјала који је у непосредном додиру са површином електрода уземљивача може значајно да утиче на величину пада потенцијала на материјалу који се налази у непосредној близини електрода, а тиме и на потенцијале у тлу и на површини тла у целој области на којој треба проверити напоне додира и корака. На основу спроведених анализа, развијена је метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла коју треба користити при прорачуну отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача, базирана на упрошћеном изразу који је добијен нумеричком анализом резултата рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима.

У четвртном поглављу, извршена је анализа утицаја додатног материјала на отпорност распрострања разматраног квадратног контурног уземљивача. Прво је на основу резултата рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима разматраног контурног уземљивача (на којима су вариран специфична електрична отпорност додатног материјала и квалитет контакта који остварује са површином електрода уземљивача) анализиран утицај карактеристика додатног материјала на контактну отпорност. На основу спроведених анализа израђен је и представљен општи алгоритам за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала које обезбеђују смањење отпорности испод вредности коју би имао уземљивач без додатног материјала, али уз идеализовану претпоставку да не постоји контактна отпорност.

У наставку четвртог поглавља, а на основу резултата рачунарских симулација спроведених на 3Д FEM моделима разматраног контурног уземљивача (на којима су варирани специфична електрична отпорност додатног материјала и његова запремина), анализиран је утицај додатног материјала на смањење реалне вредности отпорности распрострања уземљивачког система у односу на теоријску (базну) вредност. Приказани су резултати 3Д FEM симулација којима је показано да зависност процентуалног смањења реалне отпорности (у односу на базну вредност) од запремине додатног материјала улази у асимптотску област за веће запремине, чак и када је додатни материјал идеалан проводник. Представљен је математички концепт одређивања координата тачке колена криве, која представља границу између асимптотског и осталог дела поменуте зависности. Анализом добијених резултата, извршено је одређивање оптималне запремине суспензије бентонита за разматрани уземљивач. На основу спроведених анализа израђен је и представљен општи алгоритам за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача.

На примеру уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном уземљивачу далеководног стуба), у петом поглављу је представљена метода за развијање упрошћених израза за израчунавање базне вредности отпорности распрострања уземљивача. Метода је базирана на нумеричкој обради резултата добијених 3Д FEM симулацијама, а упрошћени изрази за израчунавање базне вредности отпорности распрострања уземљивача базирани су на коефицијентима којима се описује међусобни утицај појединачних елемената уземљивача.

Прво је анализом података датих у Прилогу А, који се односе на 72 различите комбинације димензија 110 kV далеководног стуба, његовог темеља и уземљивачког система, утврђен распон вредности релевантних конструкционих параметара за које је развијен скуп упрошћених израза за израчунавање теоријске (базне) вредности отпорности распрострања уземљивачког система. Затим је дат преглед постојећих метода и упрошћених аналитичких израза, датих у релевантним стандардима и приручницима, који се могу употребити за израчунавање базне вредности отпорности распрострања уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених контура (методе из једне од наведених референци прецизније су представљене у Прилогу Б). У наставку је укратко објашњено формирање 3Д FEM модела разматраног уземљивачког система. Варирањем вредности релевантних конструкционих параметара разматраног уземљивачког система (у оквиру утврђених распона), као и анализом резултата прорачуна, изведени су како нова формула за израчунавање базне отпорности усамљене контуре у хомогеном тлу, тако и скуп израза за израчунавање базне отпорности уземљивача састављеног од више галвански спојених квадратних контура у хомогеном тлу. Тачност резултата добијених помоћу изведених формула поређена је са тачношћу резултата добијених стандардним методама датим у стандардима и приручницима наведеним у литератури (резултати добијени 3Д FEM моделовањем коришћени су као референтне вредности). На крају петог поглавља извршена је анализа добијених резултата, а разматране су и разне могућности и ограничења употребе изведених формула. Такође, дате су препоруке за њихово даље унапређење.

У шестом поглављу је приказан општи алгоритам за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексних уземљивачких система уз уважавање контактне отпорности. Предложени алгоритам је базиран на додатном тест мерењу, скупу упрошћених израза за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања уземљивача (поглавље 3) и скупу упрошћених израза за израчунавање базне отпорности распрострања сложених уземљивачких система (поглавље 5). Прво је показано да упрошћени изрази из поглавља 3 и 5 могу да се употребе за израчунавање укупне отпорности квадратних контурних уземљивача разних димензија, уколико су положени у тло познатих карактеристика (којима се описује квалитет контакта који тло формира са електродама), као и да се њиховом применом постиже веома висока

тачност добијених резултата. Затим је показано како тло непознатих карактеристика у погледу остваривања контакта са електродама може да се представи параметрима који се процењује на основу резултата тест мерења. Потврђено је да је коришћењем тих параметара и употребом упрошћених израза из поглавља 3 и 5 могуће, са задовољавајућом тачношћу, одредити укупну отпорност распростирања како квадратног контурног уземљивача, тако и сложеног уземљивачког система који представља комбинацију више квадратних контура (која одговара уземљивачком систему типичног 110 kV далеководног стуба). Провера тачности изведених формула и поузданости предложеног алгоритма извршена је поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Осим тога, показано је да и модификоване формуле за прорачун укупне отпорности распростирања разматраног уземљивачког система, изведене помоћу Методе Б.1 приказане у Прилогу Б, могу да се примене у оквиру развијеног алгоритма, а затим је и њихова тачност проверена поређењем добијених резултата са резултатима добијеним рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Анализом добијених резултата констатована је висока поузданост алгоритма предложеног у дисертацији, уз задовољавајућу тачност израза изведених помоћу Методе Б.1 и изузетну тачност изведених упрошћених израза из поглавља 3 и 5.

Развијене методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распростирања уземљивача типичног далеководног стуба верификоване су и експериментом који је спроведен на умањеном моделу у лабораторији. У поглављу 7 је описана коришћена експериментална поставка са електролитичком кадом напуњеном водом и умањеним моделима уземљивача израђеним од бакарне жице. Несавршен контакт између електрода уземљивача и околног тла моделован је секвенцијално постављеним деловима изолационог материјала контролисане величине дуж бакарне жице. Прво су детаљно описани конструкција и димензије умањених модела, а затим и конструкција и димензије електролитичке каде. Опрема коришћена за симулирање квара у електроенергетском систему и мерна апаратура такође су детаљно описане.

У наставку седмог поглавља описан је поступак формирања 3Д FEM модела разматране лабораторијске експерименталне поставке, јер је један од циљева био да се изврши још једно поређење резултата добијених мерењима у оквиру експеримента и резултата добијених рачунарским симулацијама спроведеним на 3Д FEM моделима. Добијени резултати, који су упоредно представљени у поглављу 7 и Прилогу В, још једном су потврдили да је 3Д FEM моделовање у оквиру проблематике разматране у овој дисертацији добро урађено. Релативно мало одступање отпорности распростирања одређених експерименталним мерењима у односу на одговарајуће отпорности израчунате 3Д FEM симулацијама објашњено је анализом физичких појава примећених током експеримента.

Провера тачности изведених формула (приказаних у поглављима 3 и 5) и поузданости предложеног алгоритма (приказаног у поглављу 6) извршена је поређењем резултата добијених њиховом употребом са резултатима мерења добијеним у оквиру описаног експеримента са умањеним жичаним моделима и електролитичком кадом. Иста провера је извршена и за примену предложеног алгоритма у комбинацији са формулама које су за разматрани случај изведене коришћењем Методе Б.1 (Прилог Б). Анализом добијених резултата још једном је потврђена поузданост предложеног алгоритма, било у комбинацији са формулама из поглавља 3 и 5, било коришћењем формула из Прилога Б.

У осмом поглављу је приказана методологија за одређивање оптималног уземљивача, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности. Објашњени су проблеми који, услед недостатка адекватних метода прорачуна, могу да настану при инсталирању уземљивача, а који за последицу имају непотребно повећање укупне суме инвестиционих трошкова предвиђене иницијалним пројектом (због предимензионисаног уземљивача или употребе превише додатног материјала, као и додатних радних сати ангажовања људи и

опреме). Развијен је и приказан општи алгоритам за пројектовање оптималног уземљивача у описаним условима, заснован на техно-економској анализи у оквиру које се пореде инсталациони трошкови уземљивача чија је иницијална конструкција модификована на разне начине, под условом да се њима постигну приближно исте отпорности распрострања (наравно, мање од захтеваних). У дисертацији су развијени сви алгоритми и упрошћени изрази неопходни за спровођење такве техно-економске анализе при пројектовању оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура. При томе треба истаћи да се развијени алгоритми, будући да су општи, могу употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

На крају рада, у оквиру закључног поглавља, сажето су приказани сви важнији резултати истраживања у оквиру дисертације, као и доприноси дисертације на пољу пројектовања оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура. Изведени су најважнији закључци и на основу њих дате смернице за даља истраживања у овој области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом „Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача” представља оригинални научноистраживачки рад у области пројектовања уземљивача. У оквиру дисертације је развијена општа методологија за одређивање оптималног уземљивача, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности. Развијен је и приказан општи алгоритам за пројектовање оптималног уземљивача у описаним условима, заснован на техно-економској анализи у оквиру које се пореде инсталациони трошкови уземљивача чија је иницијално планирана конструкција модификована на разне начине (употребом само додатних електрода, само додатног материјала или и једног и другог), под условом да су постигнуте приближно исте отпорности распрострања, мање од оних које су захтеване релевантним стандардима.

Доступни домаћи и страни стандарди и научно-стручна литература не садрже нити методе нити упрошћене аналитичке изразе помоћу којих би наведени утицаји могли да се уваже при прорачуну отпорности распрострања уземљивача. У дисертацији су развијени сви неопходни алгоритми и упрошћени изрази за спровођење описане техно-економске анализе при пројектовању оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном уземљивачу далеководног стуба) у хомогеном тлу. Будући да су општи, развијени алгоритми се могу употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде дисертације кандидат је детаљно проучио релевантну литературу из области дисертације и коректно навео 95 референци које су уско повезане са обрађеном темом. Литература обухвата широк опсег доступних публикација, од старијих до савремених. Кроз литературу је остварен добар преглед стања предметне области, чиме је постављена основа за рад на одабраној теми дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У дисертацији је показано да су како FEM и одговарајући софтвери, тако и перформансе стандардних рачунара, довољно развијени да могу успешно да се користе као алат за 3Д моделовање експерименталне поставке из разматране референце (квадратног контурног уземљивача положеног у двослојно тло, са лошим контактом између електрода и тла или окруженог додатним материјалом за смањење отпорности распрострањања). Несавршен контакт је моделован „постављањем“ ваздушних џепова између електрода и околног тла.

Варирањем релевантних димензија елемената и карактеристика материјала у оквиру 3Д FEM модела и анализом резултата прорачуна добијених спровођењем рачунарских симулација, утврђене су корелације између релевантних параметара. Те корелације се описују изразима који су добијени обрадом резултата прорачуна применом методе најмањих квадрата (коришћењем софтвера Matlab и/или Excel).

Описаним поступком је анализиран утицај броја, величине и диспозиције ваздушних џепова, и то како на отпорност распрострањања квадратног контурног уземљивача, тако и на расподелу потенцијала у околини уземљивача у случају квара. Кроз анализе резултата прорачуна утврђене су корелације између параметара помоћу којих се може описати квалитет оствареног контакта између електрода и околног тла и отпорности распрострањања разматраних уземљивача.

На сличан начин је анализиран и објашњен утицај како специфичне електричне отпорности додатног материјала, тако и побољшања контакта услед постављања додатног материјала, на отпорност распрострањања контурног уземљивача, а затим и израђен алгоритам за утврђивање неопходних карактеристика додатног материјала које треба да обезбеде циљано смањење отпорности распрострањања контурног уземљивача испод вредности која се има када се користи само уземљивач, уз претпоставку о идеалном контакту између електрода и тла.

Развијена је и општа метода за одређивање оптималне количине додатног материјала, базирана на 3Д FEM моделовању, нумеричкој анализи добијених резултата и концепту колена криве (математичке функције). Основ методе чини алгоритам за проналажење тачке колена криве, односно тачке која представља границу између асимптотске и преостале области криве релевантне за понашање система.

Пошто типичан уземљивач далеководног стуба представља комбинацију квадратних контурних уземљивача, 3Д FEM моделовањем и нумеричком анализом добијених резултата, развијени су изрази за прорачун отпорности распрострањања таквог уземљивача, као и изрази за прорачун вредности коефицијената којима се описују међусобни утицаји појединачних контура. Тачност резултата добијених помоћу развијених израза поређена је са тачношћу резултата добијених стандардним методама датим у стандардима и приручницима наведеним у литератури (резултати добијени 3Д FEM моделовањем коришћени су као референтне вредности). Истим поступком разматран је и утицај несавршеног контакта између електрода и околног тла на вредности коефицијената којима се описују међусобни утицаји појединачних контура, а затим је израђен алгоритам за израчунавање отпорности распрострањања (са уваженим ефектом несавршеног контакта) разматраног комплексног уземљивачког система.

Верификација развијене методе за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању отпорности распрострањања уземљивача типичног реалног далеководног стуба извршена је експериментом који је спроведен на умањеном моделу у лабораторији. Коришћени су електролитичка када напуњена водом и модели од бакарне жице са секвенцијално постављеним деловима изолационог материјала

контролисане величине дуж жице (они су симулирали ваздушне цевове, односно несавршен контакт између електрода уземљивача и околног тла).

Горе наведене чињенице показују да примењена методологија у потпуности одговара међународним стандардима научноистраживачког рада. Уз то, наведени поступци су у сагласности са постављеним циљевима дисертације.

3.4. Применљивост остварених резултата

У дисертацији су развијени неопходни алгоритми и упрошћени изрази за уважавање утицаја како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, при пројектовању оптималног уземљивача састављеног од једне или више галвански спојених квадратних контура (конструкције које одговарају типичном уземљивачу далеководног стуба). Они могу бити од велике помоћи пројектантима и извођачима радова који се свакодневно суочавају са задатком да у конкретним (често неповољним) условима пројектују и изведу адекватан уземљивачки систем.

Коришћењем метода, алгоритама и упрошћених израза развијених у дисертацији број понављања процедуре преправке уземљивача положеног у тло које формира несавршен контакт са електродама сигурно ће се смањити (у односу на број понављања карактеристичних за примену стандардних метода прорачуна), што ће утицати на редукцију повећања инвестиционих трошкова предвиђених иницијалним пројектом. Пошто су сви алгоритми и упрошћени изрази развијени у дисертацији општи, могу се употребити и за пројектовање оптималних уземљивача који се по типу разликују од разматраног.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат је досадашњим радом, објављивањем седам радова у часописима са *JCR* листе и великог броја радова објављених у домаћим часописима и представљених на међународним и домаћим конференцијама, учешћем у реализацији стручних и научних пројеката и техничких решења, као и кроз активности на припреми и изради докторске дисертације, стекао самосталност у научноистраживачком раду. Резултати презентовани у дисертацији показују истраживачку зрелост кандидата и способност за свеобухватну и критичку анализу научне литературе, на основу којих кандидат развија и предлаже иновативна и оригинална решења, која доводе до бољих резултата у односу на оне који карактеришу до сада публикована решења.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Основни научни доприноси остварени у дисертацији су:

1. 3Д FEM моделовање експерименталне поставке представљене у једној од наведених референци (квадратног контурног уземљивача положеног у двослојно тло, и то како са лошим контактом између електрода и тла, тако и окруженог додатним материјалом за смањење отпорности распростирања уземљивача).
2. Анализа утицаја лошег контакта између електрода и околног тла на електричне карактеристике разматраног квадратног контурног уземљивача.

3. Метода за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања разматраног контурног уземљивача.
4. Упрошћени изрази неопходни за примену методе из тачке 3.
5. Алгоритам за одређивање погодних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности.
6. Алгоритам за процену граничне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача после које његово даље додавање нема практичног ефекта.
7. Нова формула за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања усамљене квадратне контуре положене у хомогено тло.
8. Формуле за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања уземљивача састављеног од више галвански спојених квадратних контура положених у хомогено тло.
9. Метода за извођење упрошћених, али довољно тачних, изрази за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при израчунавању укупне отпорности распрострања било ког комплексног уземљивача.
10. Општи алгоритам за израчунавање укупне отпорности распрострања комплексног уземљивачког система уз уважавање контактне отпорности, базиран на додатном тест мерењу, скупу упрошћених изрази за уважавање утицаја несавршеног контакта између електрода и околног тла при прорачуну отпорности распрострања сложених уземљивача, као и скупу упрошћених изрази за израчунавање теоријске (базне) отпорности распрострања.
11. Модификоване формуле за прорачун укупне отпорности распрострања разматраног уземљивачког система, изведене помоћу једне од стандардних метода.
12. Општа методологија за одређивање оптималног уземљивача, са уважавањем како несавршеног контакта између електрода и околног тла, тако и опције употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности.
13. Општи алгоритам за пројектовање оптималног уземљивача у условима несавршеног контакта између електрода уземљивача и околног тла.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Развијена методологија за одређивање оптималног уземљивача у условима несавршеног контакта између електрода и тла омогућава значајно унапређење у пракси извођења уземљивачких система. Коришћењем метода, алгоритама и упрошћених изрази развијених у дисертацији, пројектант (или извођач радова) може да узме у обзир утицај контактне отпорности, чије непознавање или неуважавање, што је чест случај у постојећој пракси, може да доведе до значајног одступања измерене од пројектом одређене отпорности распрострања уземљивача. Предложена методологија омогућава налажење оптималног техничко - економског решења за предметне уземљивачке системе.

Резултати приказани у дисертацији указују на потребу за развојем методе помоћу које би се уважаио несавршени контакт између електрода уземљивача и тла и при прорачуну напона додира и корака. Осим тога, потребно је испитати утицај врсте и количине додатног материјала употребљеног за смањење отпорности распрострања уземљивача на расподелу потенцијала на површини тла у случају квара, односно на напоне додира и корака.

Недостатак предложених алгоритама за одређивање неопходних карактеристика додатног материјала за елиминацију контактне отпорности, као и за процену оптималне

количине додатног материјала за смањење отпорности распрострања уземљивача, представља њихова базираност на 3Д FEM симулацијама, а не на лако применљивим упрошћеним изразима. Изналажење оваквих израза и упрошћавање поменутих алгоритама представља простор за даље истраживање у овој области.

Све анализе у раду базиране су на претпоставци да је тло хомогено, због чега је директна примена резултата дисертације ограничена на таква земљишта.

Већину метода, алгоритама и упрошћених израза развијених у дисертацији, који представљају њен главни научни допринос, кандидат је већ објавио у научно-стручним часописима са *JCR* листе и представио на домаћој научној конференцији.

4.3. Верификација научних доприноса

У току истраживачког рада у ужој области теме докторске дисертације, кандидат мр Јован Трифуновић објавио је следеће радове:

Категорија M21:

1. **J. Trifunovic**, M. Kostic, An algorithm for estimating the grounding resistance of complex grounding systems including contact resistance, *IEEE T. Ind. Appl.* 51 (2015) 5167–5174. (ISSN 0093-9994, IF (2014) = 1.756, DOI: 10.1109/TIA.2015.2429644)

Категорија M22:

1. **J. Trifunovic**, M. Kostic, Quick calculation of the grounding resistance of a typical 110 kV transmission line tower grounding system, *Electr. Pow. Syst. Res.* 131 (2016) 178–186. (ISSN 0378-7796, IF (2014) = 1.749, DOI: 10.1016/j.epsr.2015.10.014)

Категорија M23:

1. **J. Trifunović**, The algorithm for determination of necessary characteristics of backfill materials used for grounding resistances of grounding loops reduction, *J. Electr. Eng.* 63 (2012) 373–379. (ISSN 1335-3632, IF (2012) = 0.546, DOI: 10.2478/v10187-012-0055-1)
2. **J. Trifunovic**, M. Kostic, Analysis of influence of imperfect contact between grounding electrodes and surrounding soil on electrical properties of grounding loops, *Electr. Eng.* 96 (2014) 255–265. (ISSN 0948-7921 (Print) 1432-0487 (Online), IF (2014) = 0.367, DOI: 10.1007/s00202-013-0291-9)

Категорија M63:

1. **Ј. Трифуновић**, Примена методе коначних елемената за развој алгоритама и формула неопходних за пројектовање уземљивача у условима несавршеног контакта између електрода и тла и употребе додатног материјала за смањење контактне отпорности, SYM-OP-IS 2015: XLII Симпозијум о операционим истраживањима, Сребрно језеро, Србија, 2015, сс. 64–67.
2. **Ј. Трифуновић**, Метода за процену оптималне количине додатног материјала за смањење отпорности распрострања контурног уземљивача, SYM-OP-IS 2015: XLII Симпозијум о операционим истраживањима, Сребрно језеро, Србија, 2015, сс. 72–75.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

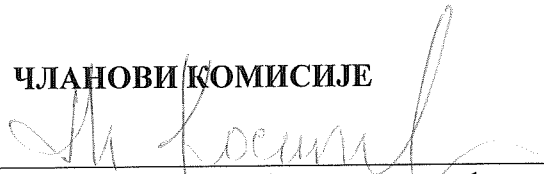
На основу чињеница изложених у овом извештају, Комисија је закључила да докторска дисертација кандидата **мр Јована Трифуновића** под називом „**Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача**” испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У дисертацији је детаљно приказан оригинални приступ пројектовању и оптимизацији уземљивача у условима несавршеног контакта између електрода и тла. Кроз дисертацију су приказане вештине кандидата у коришћењу савремених истраживачких метода, уз поштовање свих захтеваних етичких норми. Кандидат је у дисертацији пратио светске стандарде у области пројектовања и анализе уземљивача и употребио савремене алате и методе који се у ту сврху користе. Комисија посебно истиче да методе, алгоритми и упрошћени изрази развијени и приказани у докторској дисертацији, поред научних доприноса, имају и практичну примену у области пројектовања уземљивача.

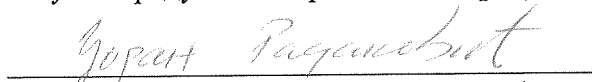
У складу са напред изнетим, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „**Методологија за уважавање несавршеног контакта између електрода и тла при прорачуну отпорности распрострања контурних уземљивача**” кандидата **мр Јована Трифуновића** прихвати, изложи на увид јавности и упуту на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, као и да се после њеног усвајања одобри јавна усмена одбрана дисертације.

Београд, 28.12.2015. год.

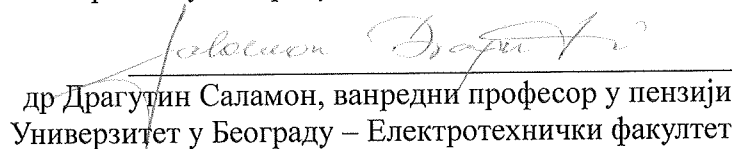
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



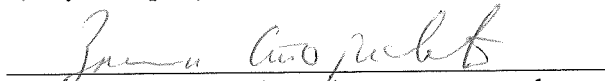
др Миомир Костић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



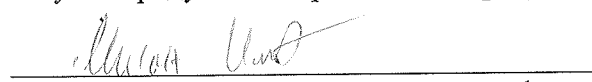
др Зоран Радаковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Драгутин Саламон, ванредни професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Златан Стојковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Милан Илић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет