

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата **Стевана Станишића** за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 1470-39 од 10. 10. 2023. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Стевана Станишића** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „Унапређење модела за прорачун основних параметара уземљивача у условима тла са танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности“ (на енглеском: *“Improvement of the calculation models for the basic grounding system parameters for soil with a thin surface layer of high electrical resistivity”*).

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Стеван, Милан, Станишић је рођен 14. 1. 1989. у Београду, Република Србија.

Основну школу „Јован Стерија Поповић“ на Новом Београду завршио је школске 2003/2004. године као носилац Вукове дипломе, а затим и IX београдску гимназију „Михаило Петровић Алас“ школске 2007/2008. са одличним успехом.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2008/2009. године. Дипломирао је октобра 2012. године на смеру Електроенергетски системи, са просечном оценом 8,56. Дипломски рад „Системи за мониторинг и аквизицију података фотонапонских система“ одбранио је са оценом 10 код ментора проф. др Зорана Радаковића.

Мастер студије је уписао школске 2012/2013. године на модулу Електроенергетски системи. Диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства стекао је децембра 2013. године са просечном оценом 9,80. Мастер рад „Примена фази логике у дијагностици високонапонске опреме“ одбранио је са оценом 10 код ментора проф. др Златана Стојковића.

Докторске студије је уписао школске 2016/2017. године на модулу Енергетски претварачи и погони. На докторским студијама је положио све испите са просечном оценом 10.

Обавио је шестомесечну стручну праксу 2014. године у немачкој компанији R+S Solutions GmbH из Фулде, Немачка, као стипендиста Фондације др Зоран Ђинђић и источног комитета

немачке привреде (*Ost-Ausschuss der Deutschen Wirtschaft*). Од марта 2015. године до септембра 2018. године био је запослен као пројектни инжењер за индустријску аутоматизацију у фирми Информатика д.о.о. Од октобра 2018. године до јуна 2023. године био је запослен као електроинжењер / руководиоца пројекта у фирми *UBConnect Int* д.о.о. Од јуна 2023. године запослен је као инжењер енергетике у фирми *Icentic soft* д.о.о.

Од страних језика говори енглески и немачки. За немачки има Ц1 диплому Гете института у Београду од јануара 2014. године.

Његов истраживачки рад на докторским студијама усмерен је на област енергетских уземљивача и моделовање истих помоћу софтвера на методи коначних елемената (*FEM – Finite elements method*) за одређивање расподеле електромагнетног поља.

До сада је објавио 2 научна рада у међународним часописима са SCI листе, 1 рад у домаћем часопису, 1 рад на међународној конференцији и 2 рада на домаћим конференцијама.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Стеван Станишић је уписао докторске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду 24. октобра 2016. године, на модулу Енергетски претварачи и погони. До сада је положио предвиђен број изабраних испита са просечном оценом 10 и испунио све обавезе у оквиру студијског програма. У табели 1 је дат списак предмета и обавеза са оценама и оствареним ЕСПБ бодовима.

Табела 1 – Преглед испуњености обавеза током докторских студија

Р. бр.	Назив предмета/обавезе	Оцена	ЕСПБ
1.	Уземљивачки системи	10	9
2.	Неуралне мреже	10	9
3.	Интеграција електромоторних погона у сложене системе покретања и управљања	10	9
4.	Прелазне појаве у електричним машинама	10	9
5.	Немачки језик	10	6
6.	Позитивни ефекти употребе бентонита у системима уземљења	10	9
7.	Одабрана поглавља из специјалних електричних инсталација	10	9
8.	Математичко моделирање у електротермији	10	9
9.	Примена програмских алата у електроенергетици	10	9
10.	Метод коначних елемената у електромагнетици	10	9
11.	Научно стручни рад		3
12.	Студијски истраживачки рад I		15
13.	Студијски истраживачки рад II		15

Кроз положене испите, кандидат:

- је проучавао међусобни утицај сложених уземљивачких система у хомогеном тлу на напон додира и корака – посматран је мрежни уземљивач (за димензије 25 m x 25 m и 32,5 m x 32,5 m, у оба случаја са квадратним окцима 5 x 5, односно 6,25 x 6,25 m) и квадратног контурног уземљивача (једно окце величине 5 m x 5 m), за случајеве: 1) поменути уземљивачки системи међусобно су галвански повезани и струја квара се одводи истовремено и са једног и са другог, 2) контура стоји као усамљена метална структура у околини мрежног уземљивача са којег се одводи струја квара и 3) контура је повезана са неутралном тачком друге мреже, а са мрежног уземљивача се одводи струја квара. За испитивање је коришћен софтвер на бази методе коначних елемената (*COMSOL Multiphysics*);
- се упознао са облашћу неуралних мрежа, њиховим формама, наменама и применама, и испитивао могућности примене на предикцију температуре горњег уља дистрибутивног трансформатора снаге 200 kVA напонског нивоа 11 kV/0,4 kV, кроз коришћење *Neural Network Toolbox*-а у *Matlab* окружењу;
- се упознао са облашћу управљања електромоторних погона и у програмском пакету *Matlab* је оформио програм са графичким корисничким интерфејсом за комуникацију путем USS протокола са фреквентним регулатором повезаним са асинхроном машином и тестирао управљачку функционалност програма на лабораторијској поставци;
- се бавио проблематиком прелазних појава у електричним машинама и у *Matlab/Simulink* окружењу оформио модел шестофазне асинхроне машине који уважава ефекат засићења магнетског кола на путу главног флукса, ефекат засићења на путевима расутог флукса, као и појаву потискивања струја у кавезном ротору;
- је изучавао позитивне ефекте употребе бентонита у системима уземљења;
- је изучавао област катодне заштите са нарочитим освртом на формирање *PLC/SCADA* система за аутоматско управљање станицама катодне заштите за примену на гасоводима;
- је оформио детаљан модел киоска трансформаторске станице у софтверу на бази методе коначних елемената (*COMSOL Multiphysics*) за прорачун у условима природног хлађења;
- је проучавао примену програмских алата у електроенергетици;
- се упознао са основама методе коначних елемената за примену у електромагнетици.

Стручни и истраживачки рад кандидата Стевана Станишића током докторских академских студија обухвата, али није ограничен на:

- стицање искустава у научном истраживању у области прорачуна основних параметара уземљивачких система и презентовању резултата тих истраживања;
- примену и проширење знања из области програмирања и математичког моделовања;
- истраживање метода за интерпретацију мерења специфичне електричне отпорности тла извршених Венеровом методом, са посебним освртом на одређивање параметара двослојног модела тла за случај постојања плитког површинског слоја велике специфичне електричне отпорности. Из тог истраживања су проистекли научни рад који је кандидат презентовао на домаћем скупу (*CIREN*) и научни рад категорије M23 објављен у међународном часопису (*Electrical Engineering*);
- истраживање везано за прорачун напона додира уважавајући физичку расподелу струје квара у тло око уземљивачког система. Из тог истраживања је проистекао научни рад категорије M21 који је објављен у врхунском међународном часопису (*IEEE Transactions on Power Delivery*);
- истраживање могућности примене софтвера на бази методе коначних елемената за прорачун основних параметара уземљивача: отпорности распростирања, напона додира и напона корака. Из тог истраживања је проистекао научни рад који је кандидат презентовао на домаћем скупу (*CIREN*).

У наставку је дат списак објављених радова кандидата Стевана Станишића.

Рад објављен у врхунском међународном часопису (категорија **M21**):

1. **S. Stanisic**, Z. Radakovic, "Calculation of Touch Voltage based on physical Distribution of Earth Fault Current", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 32, No. 5, pp. 2246-2254, Oct. 2016, DOI: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2016.2618062>.

Рад објављен у међународном часопису (категорија **M23**):

2. **S. M. Stanišić**, Z. R. Radaković, "Method for characterization of soil electrical resistivity based on Wenner measurements by means of Nelder–Mead algorithm and FEM calculations", *Electrical Engineering*, Aug. 2023, DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-023-01950-z>.

Рад објављен у националном часопису међународног значаја (категорија **M24**):

3. **S. Stanisic**, M. Jevtic, B. Das, Z. Radakovic, "Fem CFD analysis of air flow in kiosk substation with the oil immersed distribution transformer", *Facta Universitatis: Electronics and Energetics*, Vol. 31, No. 3, pp. 411-423, Sept. 2018 DOI: <https://doi.org/10.2298/FUEE1803411S>.

Рад објављен у зборнику саопштења са међународног скупа штампано у целини (категорија **M33**):

4. **С. Станишић**, Б. Брковић, М. Јечменица, З. Лазаревић, „Проширени модел шестофазне асинхроне машине“, *XVIII међународни симпозијум INFOTEH-JAHORINA*, Јахорина, 20-22. мар. 2019, ENS-2-4, стр. 90-95.

Радови објављени у саопштењима са скупова националног значаја штампано у целини (категорија **M63**):

5. **С. Станишић**, З. Радаковић, „Примена модерних FEM софтвера за одређивање отпора уземљења, напона додира и напона корака“, *X јубиларно саветовање о електродистрибутивним мрежама са регионалним учешћем, CIRED*, Врњачка Бања, 26-30. сеп. 2016, R-1.18.
6. **С. Станишић**, З. Радаковић, „Примена Венерове методе на тло са танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности“, *XII саветовање о електродистрибутивним мрежама са регионалним учешћем, CIRED*, Врњачка Бања, 30.8-3.9. 2021, R-1.18.

Кандидат је 10. новембра 2023. године на Електротехничком факултету у Београду јавно и усмено бранио предложену тему докторске дисертације под радним насловом: „Унапређење уземљивачке технике у условима тла са танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности“ пред Комисијом у саставу:

1. др Јован Трифуновић, ванредни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду,
2. др Драган Тасић, редовни професор, Електронски факултет, Универзитет у Нишу, и
3. др Жељко Ђуришић, редовни професор, Електротехнички факултет, Универзитет у Београду.

На јавној, усменој одбрани предложене теме Комисија је закључила да је кандидат Стеван Станишић добио оцену задовољно и да испуњава потребне услове за рад на предложеној теми докторске дисертације на Електротехничком факултету Универзитета у Београду. Кроз дискусију на усменој одбрани је предложено побољшање наслова дисертације, са чиме су се касније сложили кандидат и ментор. Нови наслов дисертације гласи „**Унапређење модела за прорачун основних параметара уземљивача у условима тла са танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности**“.

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Од резултата које је кандидат постигао у свом досадашњем стручном и научном раду, издвојили бисмо следеће:

- поседује 120 (сто двадесет) ЕСПБ бодова, које је остварио полагањем испита на докторским студијама и обављањем научно-истраживачких обавеза;
- јавно је одбранио тему докторске дисертације 10. новембра 2023. године пред Комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета Универзитета у Београду на 890. седници одржаној 10. 10. 2023. године (др Јован Трифуновић, др Драган Тасић, др Жељко Ђуришић);
- публиковао је укупно шест радова, од којих један у врхунском међународном часопису, један у међународном часопису, један у националном часопису међународног значаја, један у зборнику саопштења са међународног скупа штампано у целини, два у саопштењима са скупова националног значаја штампана у целини, што га квалификује за научни рад, и
- поседује довољно знања и научног искуства из области коју покрива предложена тема докторске дисертације.

Закључујемо да кандидат Стеван Станишић у сваком погледу испуњава услове који га квалификују да приступи изради докторске дисертације са предложеном темом.

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет докторске дисертације је прорачун основних параметара уземљивачких система у условима тла са танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности. Темом уземљења су се бавили истраживачи и инжењери у развоју од самог почетка израде електроенергетских мрежа. Због тога се може рећи да област теме докторске дисертације спада у класичне инжењерске проблеме, за које постоји велика база знања и искуства. Поред дугог времена бављења овом проблематиком, висок ниво знања и метода постигнут је због врхунске важности правилног пројектовања и извођења уземљења и заштитних електричних компоненти. Задатак уземљивачких система је да одводећи струју кvara у околно тло посредством заштитних компоненти искључе напајање електричном енергијом у случају настанка кратког споја између делова који су у нормалном раду под напоном и делова који у нормалном раду нису под напоном. Грешке које настају услед погрешног пројектовања, извођења и одржавања могу да доведу до огромних материјалних последица и повреда, па и смрти, људи и животиња. Задатак система уземљења и заштитних компоненти је да при настанку наведених кратких спојева обезбеде да тачке унутар електричне инсталације, које у нормалном погону нису под напоном и са којим човек може да ступи у додир, не могу да дођу на потенцијалну разлику која превазилази дозвољену вредност. Поред поменутих кварова типа фазног земљоспоја, које су предмет стандарда [1], уземљење има кључну улогу и при атмосферским пражњењима, када се струја при атмосферском пражњењу кроз уземљивач спроводи у земљу, чиме се бави стандард [2]. Поред заштитних уземљивачких система, као делови електроенергетских система укупани у земљу, у пракси се срећу и струјне електроде за пренос енергије путем једносмерном струјом и високим напоном (енгл. *HVDC – high-voltage direct current*) – [3], [4] и [5].

Предмет којим се бави дисертација је пре свега безбедност при фазним земљоспојевима. Јачина струје земљоспоја зависи од отпорности распрострањања уземљивачког система. Може се исказати да се отпорност распрострањања састоји од две компоненте: контактнoг отпора између металних делова уземљивача и слоја тла у коме су постављени и отпорности на који наилази струја која се проводи кроз тло коначне вредности електричне отпорности од

уземљивача до удаљене (референтне) земље. Расподела струје кроз тло око уземљивача зависи од геометрије уземљивача и карактеристика тла око уземљивача. Напон додир, као и напон корака, директно су зависни од расподеле потенцијала на површини тла, а она зависи од расподеле струје у тлу. Напон додир зависи и од положаја изложених електропроводних делова. Дозвољене вредности напона додир и напона корака зависе од дужине њиховог трајања, која је једнака времену реаговања заштитне компоненте која прекида струју земљоспоја.

Како би се извршила провера горе наведених критеријума, развијен је низ метода и прорачунских поступака како за одређивање структуре и специфичне електричне отпорности тла, тако и за отпорност распрострања уземљивачког система и напоне додир и корака. У тексту који следи навешће се велики број поменутих метода и поступака, које су представљале предмет интересовања дисертације и у вези са којима су постигнути научни доприноси у досадашњем научно-истраживачком раду кандидата.

Полазни податак за пројектовање уземљивачких система су електричне карактеристике тла. Најједноставнија метода је да се изврше електрична мерења и на основу резултата мерења идентификују електричне карактеристике тла. Поступак се једноставно спроводи у случају да се специфична електрична отпорност тла не мења по дубини. Постоје поступци и софтверска подршка за одређивање карактеристика за тло комплекснијих карактеристика. Кроз искуство извођења уземљивача у специфичним пустињским условима, идентификован је проблем одређивања карактеристика тла у случајевима у којима тло садржи танак површински слој високе специфичне електричне отпорности. У дисертацији ће бити разматран такав случај.

Као друга целина при пројектовању уземљивачког система може се идентификовати одређивање отпорности распрострања уземљивачког система дефинисане конфигурације укопаног директно у тло или постављеног у материјал између металних делова уземљивача и тла (бетон или бентонит, на пример). У прошлости су развијене једначине за отпорности распрострања за низ практичних конфигурација уземљивачких система, које су настале као резултат одређивања коефицијената који фигуришу у таквим једначинама, тако да се добију што мања одступања од резултата које дају прорачуни вршени помоћу наменских софтвера који решавају једначине електромагнетског поља за дефинисане топологије уземљивача постављене у тло задатих карактеристика на задати начин. Овакви софтвери су били наменски, комерцијални или развијани за потребе истраживања: *CYMEGrd*, *CDEGS*, итд. Касније су се појавили општији *Multiphysics* програми, (нпр. *FEMM*, *ANSYS*, *COMSOL Multiphysics*) који могу да решавају проблеме расподеле струја и потенцијала у околини уземљивача. Самим тим, помоћу њих може да се одреди и отпорност распрострања уземљивачког система. Овакви програми, углавном засновани на методи коначних елемената (*FEM*), имају широку примену, што значи да су постали распрострањенији и услед ниже цене постигнуте захваљујући већем тржишту приступачнији кориснику у односу на специјализоване програме коришћене у пракси. Приступачност *Multiphysics* програма је омогућила да истраживања у вези са уземљивачким системима постану лакше изводљива – академска лиценца је прилично једноставно доступна. Управо та погодност је омогућила спровођење истраживања у склопу докторске дисертације. Један од праваца рада је примена софтвера на бази *FEM*-а за одређивање отпорности распрострања уземљивачког система и расподеле потенцијала на површи тла, од које зависе напони додир и корака, који представљају меру угрожености безбедности човека при настанку земљоспоја. За низ конфигурација из праксе извршиће се поређење резултата до којих се долази применом класичних аналитичких формула и резултата до којих се долази применом *FEM* софтвера. Сврха овог поређења је двојака: како провера самих *FEM* софтвера и начина на који се они

користе (подешавање њихових параметара), тако и идентификовање потенцијалних слабости (ниже прецизности) класичних аналитичких формула.

Једно од планираних истраживања је да се испита међусобни утицај струје која протиче кроз два стопала човека која се налазе непосредно једно поред другог, односно да ли је оправдана апроксимација (колика се чини грешка) да се отпорност између човека (моделованог као импеданса $1000\ \Omega$) и референтне земље израчунава као половина отпорности једног стопала [1]. Описано истраживање води ка повећању прецизности рачунања напона додира, што може да допринесе побољшању стандарда за израду уземљивачког система.

Из претходно наведеног, јасан је значај унапређења технике пројектовања и извођења система уземљења и подешавања електричних заштитних компоненти са становишта безбедности, пре свега од опасности од струјног удара човека при земљоспојном квару, али и заштити скупе електроенергетске опреме. Остваривање безбедности је неупитан задатак, који треба остварити са што мањим трошковима за извођење система уземљења, које се често види као „непотребан трошак“ на „невидљиву опрему“, која не служи за пренос енергије (наспрот надземном воду, на пример). Свако унапређење прорачунских метода, односно повећање њихове тачности, доводи до смањења сигурносних маргина, а последично и до габарита и цене система уземљења. Циљ предметне дисертације је управо повећање прецизности прорачуна, и то пре свега истраживање могућности које пружа примена савремених FEM софтверских алата у односу на аналитичке формуле које се традиционално користе за прорачун параметара уземљивачких система.

Први очекивани научни допринос дисертације се односе на карактеризацију тла, која се врши на основу електричних мерења, применом Венерове методе. Други очекивани научни допринос дисертације се односи на методу за прорачун напона додира, кроз развој тачније методе за његово израчунавање која узима у обзир међусобни утицај струје кроз два стопала на расподелу струја са њих. Испоставља се да оба проблема постају значајна, односно да се може доћи до унапређења прорачуна параметара уземљивачких система у случају да постоји танак слој на површини тла који има значајну специфичну електричну отпорност. Такав површински слој не подразумева искључиво вештачки насут слој (на пример, асфалт), већ може да буде природна карактеристика самог тла (као што је, на пример, пустињско). У том случају се јављају практични проблеми код класичне примене Венерове методе и метода за интерпретацију резултата мерења и карактеризацију тла. Површински слој високе специфичне електричне отпорности може да постоји услед вештачког насипања таквог слоја које се врши зарад смањења напона додира и напона корака. У том случају се јавља грешка услед апроксимације да не постоји међусобни утицај струја које при земљоспоју протичу кроз два стопала на стандардном растојању. Очекује се да интерпретација, односно одређивање параметара тла са природно присутним танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности, односно грешке која се при интерпретацији методама из литературе чини, неће значајно утицати на вредност отпорности распрострањања уземљивачког система, али да хоће на вредност напона додира и напона корака. У дисертацији се планира испитивање (доказ) наведене претпоставке.

У наставку текста се даје више детаља у вези са два најважнија очекивана доприноса у дисертацији.

За **први очекивани допринос** – одређивање карактеристика тла – потребно је дати детаљније образложење и навести ширу литературу. Једна од најраспрострањенијих метода за мерење специфичне електричне отпорности земљишта [6] је метода коју је објавио Франк Венер [7] и која је представљена још 1916. године. Метода, даље објашњена у [8], састоји се од тога да се у земљу, до дубине b , убадају 4 електроде, постављене колинеарно једна у

односу на другу и на једнаким међусобним растојањима a између суседних електрода. Спољашње 2 електроде су струјне. На њих се повезује струјни извор мерног инструмента, тако да се преко њих, кроз земљу чије се карактеристике мере, затвара струјно коло. Унутрашње 2 електроде су потенцијалне и на њих се повезује коло мерног инструмента за мерење потенцијалне разлике. Мерење се врши тако што се измерени напон, односно потенцијална разлика између потенцијалних електрода, подели са познатом вредношћу јачине струје струјног генератора мерног инструмента. Добијена вредност представља привидну електричну отпорност R земљишта. У [7] је аналитички израз за добијање специфичне електричне отпорности хомогеног тла изведен претпостављајући да 4 цилиндричне мерне електроде, пободене до дубине b , могу да се посматрају као тачке у тлу на дубини b . Ово је такође истакнуто у [6]. Потом је, помоћу методе ликова и методе суперпозиције, изведен израз за разлику потенцијала две унутрашње електроде, односно тачке на дубини b , након чега се применом аналитичких израза израчунава и специфична електрична отпорности хомогеног тла ρ . Поједностављење да се електроде цилиндричног облика посматрају као тачке на дубини b оправдано је када је дубина побадања b мерних електрода много мања од размака a између електрода (типично мања од 10%) и за тај случај може да се користи упрошћена формула такође представљена у [7], у којој ρ не зависи од b . Код мерења која се извршавају за случај тла са хомогеним карактеристикама, варирање размака a између електрода не производи разлике у погледу мерних резултата – измерена привидна електрична отпорност R (тј. напон између потенцијалних електрода подељен са непромењеном мерном струјом), односно отуд израчуната специфична електрична отпорност ρ , остају константни.

Тло у општем случају није хомогено, тј. специфична електрична отпорност није иста у различитим тачкама. Зато се Венерова мерења извршавају за различите размаке a између мерних електрода. Као резултати ових мерења добијају се такозване привидне електричне отпорности R_a , за различите размаке a за које се врше мерења. Из њих се, даље, применом поменутих формула, добијају такозване привидне специфичне електричне отпорности ρ_a . Ове привидне специфичне електричне отпорности ρ_a , које имају различите вредности за различите размаке a између мерних електрода, зависе од анизотропне карактеристике тла на следећи начин: квалитативно, привидна специфична електрична отпорност $\rho_a(a)$ одређена на основу мерења одговара стварној специфичној електричној отпорности ρ на дубини која је једнака размаку између електрода a . Другим речима, сматра се да је дубина продирања мерне струје једнака размаку a између електрода. Привидна специфична електрична отпорност $\rho_a(a)$ неће бити потпуно једнако са ρ на дубини a због тога што на вредност измерене привидне специфичне електричне отпорности имају утицај и специфичне електричне отпорности ρ из других слојева тла, а које захватају струјнице мерне струје затварајући струјни круг кроз земљу. Дакле, бољи исказ је да се ширењем размака a између мерних електрода захватају све дубљи слојеви земљишта. Ово би значило да на вредност привидне специфичне електричне отпорности ρ_a одређене из мерења при мањим растојањима a више утиче вредност специфичне електричне отпорности слоја уз површ тла. За већа растојања a на вредност ρ_a више утиче вредност специфичне електричне отпорност дубљих слојева тла.

У пракси се може догодити да се карактеристике тла могу мењати по хоризонтали унутар спољне контуре уземљивача, или у области око спољне контуре. Ова промена такође утиче на електричне карактеристике. Уколико се такав случај препозна, потребно је спровести посебне анализе. Уобичајено, овакве промене карактеристика тла не постоје, јер по правилу веће области имају сличне карактеристике, односно исту расподелу електричне проводности по дубинској координати на различитим дубинским осама по површи тла. Типично, тла се могу карактерисати као хомогена, када се специфична електрична отпорност тла не мења по дубини или су вишеслојна. Најједноставнији случај вишеслојног тла је двослојно тло: горњи слој коначне дубине h и специфичне отпорности ρ_1 и доњи слој бесконачне дубине и

специфичне отпорности ρ_2 [1]. Реално је да тло садржи и више од два слоја (на пример два слоја коначне дубине и константне електричне проводности и трећи, доњи, слој бесконачне дубине и константне електричне проводности). Могуће је и да се у неком дубинском слоју специфична отпорност тла мења континуално по неком аналитичком изразу. Примера ради, промена исушености тла доведиће до такве континуалне промене специфичне отпорности. Да би ови параметри двослојног / вишеслојног модела тла могли да се одреде на основу мерења извршених Венеровом методом, дошло је до развоја такозваних метода интерпретације. У литератури су присутне следеће методе интерпретације: емпиријска на основу поклапања са такозваним мастер кривама [9], затим од Давалибија и Блатнера [10] из 1984. год. у којој је, захваљујући напретку у рачунарској техници, по први пут примењен рачунарски програм на основу алгорита опадајућег градијента. Да би метода из [10] могла да буде примењена, претходно је у [11] изведена формула за привидну специфичну електричну отпорност за одређени размак између електрода $\rho_a(a)$ у зависности од специфичне електричне отпорности горњег слоја ρ_1 , коефицијента рефлексије између слојева k , дубине горњег слоја h , као и размака између електрода a . Главно поједностављење које је употребљено при извођењу ове формуле за привидну специфичну електричну отпорност је то да се електроде, које су цилиндричног облика, сматрају тачкама на површини тла, што је оправдано за случајеве када је испуњено $b \ll a$. Ово поједностављење је уведено да би се олакшало налажење решења Лапласове једначине за потенцијале тачака на површини двослојног тла, где тачке на површини тла одговарају позицијама побадања потенцијалних мерних електрода. Ова метода интерпретације се користи у већини данас комерцијално доступних софтвера који имају модуле за интерпретацију и добијање двослојног модела тла интерпретацијом мерења извршених Венеровом методом.

Даље, Мелиопулос и Паралексопулос су 1986. у [12] представили статистичку методу за интерпретацију и рачунарски програм у којем је имплементирана. Овде је направљен покушај да се уважи чињеница да математичке методе интерпретације, које су до тада биле објављене, понекад дају слабе резултате због чињенице да тло готово никад није идеално двослојно, већ да је „математички“ двослојан модел тла само апроксимација реалне ситуације. Због тога ће увек постојати одступање израчунатих привидних специфичних отпорности двослојног модела (добијених коришћењем параметара двослојног тла добијених као резултат примене методе интерпретације) у односу на измерене (израчунате) на реалном тлу. Дакле, циљ оваквих приступа је да се проблем сведе на математички оптимизациони: да се оствари таква интерпретација и добију такви параметри двослојног тла, чијим коришћењем се добијају привидне специфичне отпорности чија је сума разлика (квадрата) од стварних (мерених) привидних специфичних отпорности што мања. Највеће релативно одступање интерпретираних вредности параметара у односу на стварне вредности добијено је за дубину горњег слоја. Ово је правдано чињеницом да при мерењима на умањеним моделима, примењеним током истраживања приказаног у [12], долази до значајне мерне грешке, непрецизног позиционирања мерних електрода и да није извршен довољан број мерења. За израчунавање вредности ρ_1 , ρ_2 и h , не користе се поменуте формуле, већ модел изнет у [13]. Лоша мерења су такође коментарисана у [12] где се сматра да су она проузрокована непрецизностима мерног инструмента и локалним променама специфичне електричне отпорности земљишта. Отуд је врло очекивано да поједина мерења не буду у складу са осталим мерењима, па је изнет предлог како да се она препознају и одстрани из интерпретације.

Структура специфичне електричне отпорности тла може бити сложенија и у литератури постоје и методе интерпретације за добијање трослојних и вишеслојних модела тла [14], [15] и [16].

У литератури постоји мноштво радова у којима се разматра идентификација карактеристика тла (тражење решења инверзног проблема потраге за параметрима модела тла који дају најбоље поклапање са мерним резултатима), полазећи од класичне методе интерпретације засноване на формулама изнетим у [10] и [11]. Примера ради, техника градијента другог реда је приказана у [17], квази Њутновске методе за добијање параметара двослојног модела тла у [18], генетски алгоритми у [19], добијање параметара вишеслојног тла употребом еволуције диференцијала у [20], добијање параметара вишеслојног тла употребом метода комплексног лика у [21], добијање параметара вишеслојног тла брзом евалуацијом привидних специфичних отпорности и њихових извода у [16]. Међутим, ни у једном од ових радова се не узима реална геометрија мерних електрода, већ се и даље примењују поједностављења примењена у формулама изнетим у [7] и [10].

Даље, 1987. год. Баишики, Остерберг и Давалиби су увели формуле [22] које уважавају стварни цилиндрични облик електрода, да би се за интерпретацију узела у обзир стварна геометрија која утиче на измерене привидне специфичне отпорности за случајеве/мерења када $b \ll a$ није примењиво. У [23] је приказано да поступак из [22] уводи већу прецизност у погледу геометријског мултипликатора (коефицијента за рачунање привидне специфичне отпорности из измерене привидне отпорности, а уместо Венеровог геометријског коефицијента са својим упрошћењима), али се за модел тла приликом естимације параметара и даље користи поступак из [11], тј. Решење Лапласове једначине за потенцијале тачака на површини тла. Другим речима, формуле из [22] не заобилазе сва упрошћења класичне методе.

Постоје екстремни случајеви тла када су примене метода интерпретација отежане, односно постоје практична ограничења у примени интерпретације резултата Венерове методе у циљу добијања карактеристика тла. У земљишту са веома танким површинским слојем који има знатно већу специфичну отпорност од нижег слоја, неопходно је извршити мерења за врло кратке размаке a који би приближно одговарали дубини горњег слоја. У том случају услов $b \ll a$ постаје практично неприменљив из разлога што није практично могуће довољно смањити дубину побадања електрода, а да оне остану механички и електрично у добром контакту са тлом чије се карактеристике мере. За стандардна тла b је обично 20 cm. Венерова метода и методе интерпретације тачне су за случајеве довољно великих размака a између електрода, односно када је $b \ll a$. У већини практичних случајева, где је очекивана дубина горњег слоја $h \geq 1$ m, нема потребе да се врше мерења на малим размацима a (мањим од 1 m). Ипак, у случају земљишта са веома танким површинским слојем који има знатно већу специфичну електричну отпорност од оне нижег слоја (на пример, услови пустињског тла), потребна су мерења на малим размацима a . Анализа ових случајева ће бити један од главних предмета истраживања у дисертацији. Мотивација за истраживања је искуство приликом интерпретација мерења наведених у [24], извршених Венеровом методом на неким од експерименталних локација. У [24], интерпретације су вршене коришћењем софтвера *CYMEGrd* [25], при чему су се јавиле бројне тешкоће.

Развој рачунарских ресурса у последњих неколико деценија омогућио је примену комплексних математичких модела, чија је примена у прошлости била тешко остварива. У дисертацији ће бити представљен нов приступ који се не ослања на аналитичке изразе и поменута поједностављења. Метода и одговарајући рачунарски алат биће имплементирани као итеративни процес коришћењем FEM у комбинацији са нумеричким *solver*-ом за процену параметара.

Примери FEM симулација Венерових мерења изнети су у [26] и [27]. У литератури се могу наћи резултати истраживања коришћења другачијих распоред електрода од колинеарно постављених електрода за мерења Венеровом методом [28].

За други очекивани допринос, извршиће се испитивање међусобног утицаја струје кроз стопала при земљоспоју и њихов утицај на напон додир базираће се на примени Тевененове теореме, према поступку из базног стандарда [1], при чему ће се користити FEM софтверски алат за квантификацију међусобног утицаја струје земљоспоја кроз стопала на уобичајеном растојању. Утицај ће се размотрити за различите дубине и специфичне отпорности насутог слоја велике специфичне отпорности, после чега ће се предложити корекциона функција за случајеве за које се добије резултат да постоји значајан практични утицај на напон додир.

Циљеви ове дисертације:

Циљ 1 је да се дефинише нова метода за интерпретацију резултата мерења Венеровом методом која ће бити у стању да као резултат да тачније параметре модела од постојећих метода. Очекује се да се значајно практично побољшање постигне за двослојне моделе тла које одликује висок коефицијент рефлексije [23] и код којих је горњи слој врло плитак.

Остварење циља 1 ће се спровести етапно. Прва етапа је да се користе FEM рачунарске симулације помоћу *COMSOL Multiphysics* [29] софтвера и *fminsearch solver*-а из *Matlab* програмског пакета [30]. Реализација ће бити кроз израду *Matlab* програма, изведена као синтеза алгоритма *solver*-а са FEM рачунарским симулацијама. Друга етапа је разматрање могућности да се FEM симулације врше само за мања растојања између електрода, а за већа растојања користе прорачуни помоћу аналитичких израза. Кроз прву етапу би се остварио нови алгоритам, а друга етапа би представљала истраживање и остварење могућности оптимизације алгоритма, пре свега у смислу дужине трајања прорачуна.

Циљ 2 је извођење побољшане формуле за израчунавање напона додир на основу физичке расподеле струја [31] у присуству насутог слоја, уважавањем међусобног утицаја струје кроз два стопала на стандардном растојању. Тачност постојећих формула ће се испитати за различите карактеристике тла и побољшање ће се извршити за ситуације у којима се идентификује одступање вредности напона додир добијених применом постојећих формула од стварних. Као „стварне вредности“ ће се користити вредности добијене *COMSOL Multiphysics* [29] софтвером. Истраживање ће бити спроведено на низу уземљивачких система типичних за надземне водове и то: цевастих (пречника 19 mm и дужина 3,6 и 10,8 m), квадратних контура (димензија 5 m x 5 m пресека траке 40 mm x 4 mm, затим комбинација наведених квадратних контура и цеви дужине 3,6 m постављених у ћошковима контура, за случајеве са и без материјала за побољшање карактеристика, бентонита или такозваног GEM (енгл. *Ground enhancement material*)).

Циљ 3 је сагледавање ефекта тачније интерпретације карактеристика двослојног тла са плитким горњим слојем велике специфичне електричне отпорности, добијене остварењем циља 1. Очекује се да се неће уочити приметан ефекат на отпорност распрострања уземљивачког система, али да ће се појавити значајна разлика у израчунатим напонима додир и корака.

3. Релевантна литература из области истраживања

- [1] "IEEE guide for safety in AC substation earthing," *IEEE Standard 80-2013*, May 2015.
- [2] „Protection against lightning," *IEC 62305*, 2010.
- [3] W. Ruan, J. Ma, F. P. Dawalibi and R. D. Southey, "Performance of HVDC ground electrode in various soil structures," in *Proc. 2002 Int. Conf. Power Syst. Technol.*, Kunming, China,

Oct. 13-17, 2002.

- [4] W. Ruan, R. D. Southey, S. Fortin and F. P. Dawalibi, "Effective Sounding Depths for HVDC Grounding Electrode Design: Wenner versus Schlumberger Methods," in *2005 IEEE/PES Transm. Distrib. Conf. Expo. Asia and Pacific*, Dalian, China, Aug. 18-18, 2005.
- [5] T. N. Giao and M. P. Sarma, "Effect of a Two-Layer Earth on the Electric Field Near HVDC Ground Electrodes," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vols. PAS-91, no. 6, pp. 2356 - 2365, Nov. 1972.
- [6] "IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Grounding System," *IEEE Std 81-2012*, Dec. 2012.
- [7] F. Wenner, "A Method of Measuring Earth Resistivity," *Bul. Bur. Standards*, vol. Scientific Paper 12, no. S-258, pp. 469-478, 1916.
- [8] "Standard Test Method for Field Measurement of Soil Resistivity Using the Wenner Four-Electrode Method," *ASTM G57 95a*, Jun 1995.
- [9] R. W. Moore, "An Empirical Method of Interpretation of Earth-resistivity Measurements," *Pet. Technol.* 7, vol. 7, pp. 1-18, 1944.
- [10] F. Dawalibi and C. J. Blattner, "Earth Resistivity Measurement Interpretation Techniques," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vols. PAS-103, no. 2, pp. 374-382, Feb. 1984.
- [11] F. Dawalibi, "Transmission Line Grounding," *EPRI Research Project 1494-1, Final Report EL 2699*, Oct. 1982.
- [12] A. P. Meliopoulos and A. D. Papalexopoulos, "Interpretation of Soil Resistivity Measurements: Experience with the Model SOMIP," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 1, no. 4, pp. 142-151, Oct. 1986.
- [13] A. P. Meliopoulos, R. P. Webb and E. B. Joy, "Analysis of Grounding Systems," *IEEE Trans. Power App. Syst.*, Vols. PAS-100, no. 3, pp. 1039-1048, Mar. 1981.
- [14] F. Dawalibi and N. Barbeito, "Measurements and computations of the performance of grounding systems buried in multilayer soils," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, no. 4, pp. 1483-1490, Oct. 1991.
- [15] T. Takahashi and T. Kawase, "Analysis of apparent resistivity in a multi-layer earth structure," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 5, no. 2, pp. 604-612, Apr. 1990.
- [16] J. Yang and J. Zou, "Parameter Estimation of a Horizontally Multilayered Soil With a Fast Evaluation of the Apparent Resistivity and its Derivatives," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 2169-3536, 16 Mar. 2020.
- [17] J. L. del Alamo, "A second order gradient technique for an improved estimation of soil parameters in a two-layer earth," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 6, no. 3, pp. 1166-1170, Jul. 1991.
- [18] R. Batista, M. R. de Araújo and R. R. Saldanha, "Parameter estimation of a two-layer soil model using Quasi-Newton methods," in *2018 Simposio Brasileiro de Sistemas Eletricos (SBSE)*, Niteroi, May, 12-16, 2018.
- [19] W. P. Calixto, L. M. Neto, M. Wu, K. Yamanaka and E. P. Moreira, "Parameters Estimation of a Horizontal Multilayer Soil Using Genetic Algorithm," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 25, no. 3, pp. 1250 - 1257, Jul. 2010.
- [20] W. R. Pereira, M. G. Soares and L. M. Neto, "Horizontal Multilayer Soil Parameter Estimation Through Differential Evolution," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 31, no. 2, pp. 622-629, Apr. 2016.
- [21] B. Zhang, X. Cui, L. Li and J. He, "Parameter estimation of horizontal multilayer earth by complex image method," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 20, no. 2, pp. 1394-1401, Apr. 2005.
- [22] R. S. Baishiki, C. K. Osterberg and F. Dawalibi, "Earth Resistivity Measurements using Cylindrical Electrodes at short Spacings," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 2, no. 1, pp. 64-71,

Jan. 1987.

- [23] S. M. Stanišić and Z. R. Radaković, "Method for characterization of soil electrical resistivity based on Wenner measurements by means of Nelder–Mead algorithm and FEM calculations," *Electrical Engineering*, Aug. 2023.
- [24] Z. Radaković, M. Jovanović and V. Milošević, "Application of Earthing Backfill Materials in Desert Soil Conditions," *IEEE Trans. Ind. Appl. (Special Issue on Grounding Systems)*, vol. 51, no. 6, pp. 5288-5297, Nov./Dec. 2015.
- [25] *CYMEGrd software, CYME, Saint-Bruno, QC, Canada, Dec. 2000.*
- [26] M. Jesenik, A. Hamler and M. Trlep, "Analyzing of a Soil Model using the Finite Element Method for Simulation of Soil Resistivity Measurement," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 57, no. 7, pp. 1-4, Jul. 2021.
- [27] M. Jesenik and M. Trlep, "Testing of multi layered soil models based on data obtained from Finite Element Models with known soil structures using metaheuristics for parameters' determination," *Appl. Soft Comput.*, vol. 95, Oct. 2020.
- [28] O. Ramos-Leaños, F. A. Uribe, A. Valcárcel, A. Hajiaboli, S. Franiatte and F. P. Dawalibi, "Nonlinear Electrode Arrangements for Multilayer Soil Resistivity Measurements," *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 62, no. 5, pp. 2148-2155, Oct. 2020.
- [29] "COMSOL Multiphysics® v. 6.0," COMSOL AB, Stockholm, Sweden, [Online]. Available: www.comsol.com.
- [30] *MATLAB. (2022). (R2022b). Natick, Massachusetts: The MathWorks Inc..*
- [31] S. Stanišić and Z. Radaković, "Calculation of Touch Voltage Based on Physical Distribution of Earth Fault Current," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 32, no. 5, pp. 2246 - 2254, Oct. 2017.
- [32] "fminsearch," MathWorks, [Online]. Available: <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/fminsearch.html>. [Accessed 24 June 2022].
- [33] J. A. Nelder and R. Mead, "A simplex method for function minimization," *Comput. J.*, vol. 7, no. 4, pp. 308-313, Jan. 1965.
- [34] J. C. Lagarias, M. H. Reeds, M. H. Wright and P. E. Wright, "Convergence Properties of the Nelder-Mead Simplex Method in Low Dimensions," *SIAM J. Optim.*, vol. 9, no. 1, pp. 112-147, 1988.
- [35] Z. Radaković, N. Paunović, V. Milošević and M. Jovanović, "Generating simple-to-apply comprehensive engineering recommendation for earthing safety in systems with solidly earthed neutral," *IET Gener. Transm. Distrib.*, vol. 9, no. 16, pp. 217-252, <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2014.0853>, Dec. 2015.

4. Полазне хипотезе

Истраживачки рад биће базиран на следећим полазним хипотезама:

Тренутни софтвери могу да решавају FEM моделе уземљивачких система, односно електрода положених у околно тло, описаних Максвеловим једначинама, са великом тачношћу, у току прихватљиво дугог времена.

Могуће је софтверски реализовати методе оптимизације за претрагу параметара двослојног модела тла где се у свакој итерацији позивају FEM симулације вршења мерења Венеровом методом.

Могуће је успоставити нову методу, и софтверски је реализовати на начин наведен у претходном пасусу, за интерпретацију мерења Венеровом методом за одређивање параметара двослојног или вишеслојног земљишта.

Могуће је остварити унапређење технике одређивања карактеристика тла са танким површинским слојем високе електричне отпорности, јер код постојећих метода практично није могуће спровести поступак који даје довољно тачне резултате.

Могуће је побољшане формуле за израчунавање напона корака на основу физичке расподеле струја, уважавањем међусобног утицаја струје кроз два стопала на стандардном растојању, коришћењем FEM (*COMSOL Multiphysics* софтвера).

5. Научне методе истраживања

У раду ће се користити различите научне методе:

Рачунарске симулације FEM софтвером (базираним на методи коначних елемената) – *COMSOL Multiphysics* [29] – за симулирање мерења Венеровом методом као и уземљивача и струје кроз тело особе приликом струјног удара изазваног земљоспојем.

Коришћење постојећих *solver*-а (из *Matlab* [30]) као што је *fminsearch* [32] на бази алгоритма *Nelder-Mead* [33], [34] за одређивање параметара модела тла, при чему је неопходно софтверски реализовати интеграцију наведеног *solver*-а са FEM рачунарским симулацијама у *COMSOL Multiphysics* [29].

Као метода контроле, резултати новоразвијених метода и програма упоредиће се са резултатима добијених применом комерцијалних софтвера као што је *CYMEGrd* [25] базираних на методу изложеном у [10].

Поређење резултата прорачуна са резултатима мерења у пустињским пределима [24], где је детектован специфичан тип тла са танким површинским слојем високе специфичне отпорности. Мерења су вршена током истраживачких и развојних активности у којима је учествовао предложени ментор докторске дисертације и који је првопотписани аутор на раду [24]. Ради се о мерењима специфичне електричне отпорности тла Венеровом методом на пет локација. Поред тога, вршена су и мерења отпорности распрострањања експерименталних уземљивача (чији облик и величине су наведени у тексту изнад везано за Циљ 1 дисертације) у периоду од годину дана као и потенцијала на површини тла у околини поменутих уземљивача из којих може да се одреди напон корака.

Анализа ефеката побољшања карактеризације тла која се постиже применом предложене методе на макроскопске карактеристике уземљивача. Циљ анализе је да се изврши квантификација промене израчунатих макроскопских параметара (отпорности распрострањања уземљивача, напона додира и напона корака) након примене тачнијих карактеристика тла као улазних податка. Као референтне вредности наведених макроскопских параметара ће се посматрати вредности добијене симулацијом у *COMSOL Multiphysics* [29] софтверу.

6. Очекивани научни доприноси

- Метода за интерпретацију карактеристика тла базирана на резултатима Венерових мерења, која у поступак интерпретације уводи FEM рачунарске симулације уместо примене формула постављених под одређеним упрошћењима. Очекује се да нова метода доведе до тачнијих резултата при карактеризацији тла са танким површинским слојем високе специфичне електричне отпорности у односу на остале слојеве тла.
- Идентификовање ефекта постигнутог побољшања карактеризације применом нове методе у односу постојеће поступке, на одређивање отпорности распростирања уземљивача, напона додир и напона корака, као макроскопских параметара уземљивачких система. Прорачуни сва три наведена макроскопска параметра зависе од карактеристика тла.
- Формуле за прецизније рачунање напона додир услед међусобног утицаја стопала на стандардном растојању, засноване на уважавању њиховог међусобног утицаја, и то за случај тла са високом вредношћу специфичне електричне отпорности површинског слоја.

7. План истраживања и структура рада

- Анализа постојеће литературе, објављених радова и важећих стандарда из области уземљења електроенергетских система и безбедности при земљоспојним кваровима.
- Упознавање са постојећим методама за мерење специфичне електричне отпорности тла.
- Упознавање са постојећим методама и њиховом имплементацијом у доступним софтверским алатима за интерпретације Венерових мерења како за двослојне, тако и за вишеслојне моделе тла.
- Примена FEM софтвера за одређивање отпорности распростирања уземљивачког система и расподеле потенцијала на површи тла. Поређење резултата софтвера примењеног на низ конфигурација уземљивача са резултатима добијеним другим методама (на пример класичних аналитичких формула) у циљу провера самих FEM софтвера и начина на који се они користе (подешавање њихових параметара). У оквиру ове активности могуће је идентификовање потенцијалних слабости (ниже прецизности) класичних аналитичких формула за неке од разматраних конфигурација уземљивача.
- Истраживање зависности напона додир услед међусобног утицаја струја које протичу кроз два стопала човека која се налазе на стандардном растојању. Истраживање ће се базирати на примени методе из стандарда, при чему ће се отпорност између стопала и удаљене референтне земље израчунавати коришћењем FEM софтвера. Предлагање корекције постојећих формула из стандарда за случајеве у којима ће се детектовати одступања које имају значајну вредност.
- Прављење модела земљишта и симулација Венерових мерења у софтверу на бази методе коначних елемената (FEM), како за случај да се електроде моделују узимајући у обзир њихов стварни облик, тако и за случај да се електроде моделују као тачке.
- Поређење резултата добијених FEM симулацијама и додатном обрадом добијених података са резултатима доступним у литератури за интерпретације Венерових мерења.
- Развој нове методе интерпретације резултата Венерових мерења да би се добили параметри двослојног модела тла који би пружили прецизне резултате чак и у случајевима постојања танког површинског слоја високе специфичне електричне отпорности у односу на доњи слој тла.

- Провера тачности методе и поређење са резултатима примене постојећих метода на синтетичким примерима (двослојна тла задатих карактеристика: дубине површинског слоја и задатих специфичних отпорности горњег и доњег слоја).
- Примена предложене и постојећих метода и поређење са резултатима мерења на више полигона са различитим карактеристикама у Уједињеним Арапским Емиратима. Скуп доступних резултата мерења обухвата класична Венерова мерења која се користе за карактеризацију тла, мерења методом пада потенцијала на основу којих се одређује отпорност распрострања (за различите конфигурације уземљивачких система наведених у тексту Циља 1), као и мерења расподеле потенцијала на површи тла из којих се могу одредити напони додира и корака. Поред резултата наведених електричних мерења, доступни су и извештаји о вађењу узорака тла бушењем по дубини до 20 m, односно геолошки параметри тла, у широј области којој припадају микро локације на којима су тестирани уземљивачи у [24] (из Циља 1). Пре поређења резултата прорачуна и мерења, спровешће се анализа колико су резултати доступних мерења комплетни и поуздани, односно за која се поређења и процене тачности предложених и постојећих метода прорачуна могу користити.
- Развој софтвера за потпуно аутоматизовану методу интерпретације на бази нумеричког оптимизационог алгоритма који позива симулације у FEM софтверу.
- Испитивање могућности оптимизације методе и софтвера тако да се за већа растојања између електрода уместо FEM симулација користе постојеће аналитичке формуле, које су довољно тачне за већа растојања између електрода, тј. када је апроксимација $b \ll a$, инхерентна у аналитичким формулама, оправдана.
- Квантификација ефекта примене побољшане карактеризације електричних карактеристика тла применом нове методе у односу постојеће поступке, на одређивање отпорности распрострања уземљивача, напона додира и напона корака. Резултати ће се дати на неколико карактеристичних примера. Крајњи ефекат побољшане карактеризације тла је смањење трошкова израде уземљивачких система (пример давања комплексне инжењерске препоруке и дефинисање оптималних карактеристика тла може се наћи у [35]).
- Публикације резултата истраживања у релевантним интернационалним часописима са импакт-фактором и писање докторске дисертације.

8. Закључак и предлог

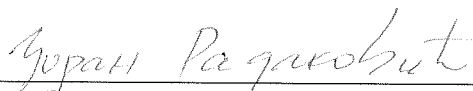
На основу приложене документације и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Стевана Станишића, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија доноси следеће закључке:

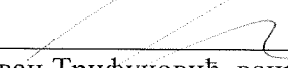
- Кандидат испуњава све законске, формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за израду докторске дисертације,
- Предложена тема „Унапређење модела за прорачун основних параметара уземљивача у условима тла са танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности“ (на енглеском: *“Improvement of the calculation model for the basic grounding system parameters for soil conditions with a thin surface layer of high electrical resistivity”*) научно је заснована и резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области Енергетски претварачи и погони.

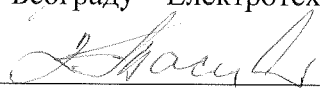
На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Стевану Станишићу одобри израду докторске дисертације под насловом „Унапређење модела за прорачун основних параметара уземљивача у условима тла са танким површинским слојем велике специфичне електричне отпорности“ (на енглеском: *“Improvement of the calculation model for the basic grounding system parameters for soil conditions with a thin surface layer of high electrical resistivity”*). За ментора Комисија предлаже др Зорана Радаковића, редовног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

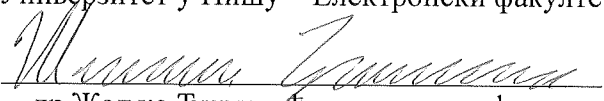
У Београду, 21. 11. 2023. године,

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


др Јован Трифуновић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Драган Тасић, редовни професор
Универзитет у Нишу – Електронски факултет


др Жељко Ћуришић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет