

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Томислава Рајића за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5008/14-1 од 14.12.2018. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата **Томислава Рајића** за израду докторске дисертације и научне заснованости теме **„Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“** (енг. "New approach in realization of longitudinal differential protection of overhead lines").

На основу материјала приложеног уз захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Томислав Рајић рођен је 22.04.1989. године у Београду. Завршио је основну школу и гимназију у Лазаревцу. Уписао је Електротехнички факултет у Београду 2008. године. У току основних студија на одсеку за енергетику, смер Електроенергетски системи, остварио је просечну оцену 9.27. Дипломирао је у септембру 2012. године. Мастер студије је уписао 2012. године на Електротехничком факултету, смер за Електроенергетске мреже и системе. Диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства стекао је септембра 2014. године. Мастер студије је завршио са просечном оценом 9.80. Завршни мастер рад под називом „Симулација подужне диференцијалне заштите далековада“ одбранио је са оценом 10. Докторске студије на Електротехничком факултету у Београду уписао је 2014. године.

Учествовао је на Електријади у Мађарској 2013. године и освојио друго место на такмичењу из предмета Анализа електроенергетских система.

Од јула месеца 2013. године до јануара 2014. године радио је у Електротехничком Институту Никола Тесла у Центру за електромерења.

Од јануара 2014. године запослен је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду најпре као сарадник у настави, а потом и као асистент. На Основним и Мастер студијама ангажован је у извођењу наставе из следећих предмета: Елементи електроенергетског система, Општа енергетика, Електромагнетна компатибилност, Кабловска техника, Практикум из софтверских алата у електроенергетици и Практикум из анализе електроенергетских система, као и лабораторијских вежби из предмета Релејна

заштита, Електрична мерења 1, Електрична мерења 2, Пројектовање помоћу рачунара у електроенергетици, Техника високог напона 2 и Практикума – Лабораторијске вежбе из електроенергетских система.

Учесник је на изради неколико елбората, студија и пројеката. Аутор је више радова публикованих у часописима са SCI листе, домаћим часописима, зборницима међународних, регионалних и домаћих конференција.

Области његовог интересовања су: релејна заштита, разводна постројења, анализа електроенергетских система и електромагнетна компатибилност.

Од 2015. до 2018. године обављао је функцију секретара Одсека за енергетику. Изабран је за члана Етичке комисије на Електротехничком факултету у Београду. Такође, члан је удружења ЦИГРЕ Србија у комитету Д1.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Кандидат је докторске студије уписао 2014. године и положио све испите који су предвиђени планом докторских академских студија на модулу Електроенергетске мреже и системи на Електротехничком факултету Универзитета у Београду са просечном оценом 9.90.

Преглед положених испита

	Назив предмета	Оцена	ЕСПБ
1	Високонапонска расклопна опрема	10	9
2	Дистрибутивни системи-оптимално планирање и експлоатација	9	9
3	Релејна заштита постројења и мрежа	10	9
4	Високонапонска мерења у електроенергетици	10	9
5	Уземљивачки системи	10	9
6	Високонапонска постројања	10	6
7	Примена програмских алата у електроенергетици	10	9
8	Мерне спреге и мерни трансформатори	10	9
9	Увод у научни рад	10	9
10	Интеграција обновљивих извора у дистрибутивни систем	10	9

Списак осталих реализованих обавеза

	Назив предмета	ЕСПБ
1	Научно-стручни рад	3
2	Студијски истраживачки рад I	15
3	Студијски истраживачки рад II	15

Списак објављених радова

Радови објављени у научним часописима међународног значаја M20

1. **Rajić T., Z. Stojanović Z.:** *An algorithm for longitudinal differential protection of transmission lines*, International Journal of Electrical Power & Energy Systems Vol. 94, pp. 276-286, January 2018, (DOI: [10.1016/j.ijepes.2017.07.001](https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2017.07.001) ISSN 0142-0615, IF 3,289) (M21).

2. Stojanović B., **Rajić T.**: *Novel approach to reconfiguration power loss reduction problem by simulated annealing technique*, International Transactions on Electrical Energy Systems, Vol. 27, Issue 12, December 2017, (DOI: [10.1002/etep.2464](https://doi.org/10.1002/etep.2464) ISSN: 2050-7038, IF 1,085) (M23).

Зборници међународних научних скупова M30

1. **Rajić T.**, Stojanović Z.: *The influence of current transformer saturation on longitudinal differential protection of transmission lines*, Mediterranean Conference on Power Generation, Transmission, Distribution and Energy Conversion (MedPower 2016), International Conference on. IET, Belgrade, Serbia, November 2016, pp. 113-119, (DOI: [10.1049/cp.2016.1102](https://doi.org/10.1049/cp.2016.1102), ISBN: 978-1-78561-406-4) (M33).

Радови објављени у научним часописима националног значаја M50

1. **Рајић Т.**, Стојановић З.: *Симулација подужне диференцијалне заштите далековод са применом додатне стабилизације и система АПУ*, Техника, Vol. 71, бр. 6, стр. 861-867, 2016 (ISSN 0040-2176, DOI: [10.5937/tehnika1606861R](https://doi.org/10.5937/tehnika1606861R)) (M51).
2. **Рајић Т.**, Микуловић Ј., Жарковић М., Шошић Д.: *Одређивање карактеристичних дијаграма потрошње применом методе минимума суме квадрата одступања*, Енергија, Економија, Екологија бр.1-2, стр. 268-274, 2016 (ISSN 0354-8651) (M51).
3. **Рајић Т.**, Ђуришић Ж.: *Утицај малих хидроелектрана на релејну заштиту у дистрибутивној мрежи*, Енергија, Економија, Екологија бр.1-2, стр. 250-257, 2017 (ISSN 0354-8651) (M51).

Зборници домаћих научних скупова M60

1. **Rajić T.**, Stojanović Z.: *Poduzna diferencijalna zaštita vodova sa primenom automatskog ponovnog uključenja*, Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEN-JAHORINA 2015, Vol. 14, Ref. ENS-2-7, mart 2015, pp.180-185 (ISBN 978-99955-763-6-3) (M63).
2. **Rajić T.**, Stojanović Z.: *Uticaj stabilizacije struje na poduznu diferencijalnu zaštitu dalekovoda*, Međunarodni naučno-stručni simpozijum INFOTEN-JAHORINA 2016, Vol. 15, Ref. ENS-1-6, mart 2016, pp.78-83 (ISBN 978-99955-763-9-4) (M63).
3. Стојковић З., Жарковић М., **Рајић Т.**: *Симулација парцијалних пражњења и њиховог мерења*, 32. Саветовање CIGRE Србија, Реф. Р Ц4-07, Златибор, 17 – 25. мај 2015. (ISBN 978-86-82317-77-7) (M63).
4. Стојковић З., **Рајић Т.**, Жарковић М.: *Нумеричка симулација расподеле електричног поља на високонапонској опреми*, 32. Саветовање CIGRE Србија, Реф. Р Ц4-08, Златибор, 17 – 21. мај 2015. (ISBN 978-86-82317-77-7) (M63).
5. Божилов М., Маринковић С., Глигоров С., Буха Д., **Рајић Т.**, Нојић С.: *Мерење струја квара у контактної мрежи ЕВП Бргуле*, 33. Саветовање CIGRE Србија, Реф. Р Б3-08, Златибор, 05 – 08. јун 2017. (ISBN 978-86-82317-80-7) (M63).
6. Буха Д., Буха Б., Јачић Д., Глигоров С., Божилов М., Маринковић С., Милосављевић С., **Рајић Т.**: *Релејне заштите које се координирају са погонским дијаграмом, функцијама система регулације побуде и заштитама електроенергетског система*, 33. Саветовање CIGRE Србија, Реф. Р Б5-14, Златибор, 05 – 08. јун 2017. (ISBN 978-86-82317-80-7) (M63).
7. **Рајић Т.**, Стојановић Б.: *Програм за проверу повезаности енергетског система*, 10. Саветовање CIRED Србија, СТК-5 Р-5.02, Врњачка Бања, 26 – 30. септембар 2016. (M63).

8. Стојановић Б., Московљевић М., **Рајић Т.:** *Ефикасни алгоритам анализе токова снага, модификовани алгоритам токова снага Нахман и Перић*, 10. Саветовање CIRED Србија, СТК-5 Р-5.01, Врњачка Бања, 26 – 30. септембар 2016. (М63).
9. Стојановић Б., **Рајић Т.:** *Нови приступ реконфигурацији симетричних радијалних дистрибутивних мрежа*, применом методе симулације каљења, 11. Саветовање CIRED Србија, СТК-5 Р-5.13, Копаоник, 24 – 28. септембар 2018. (М63).
10. Стојановић Б., **Рајић Т.:** *Економска процена реконфигурације дистрибутивних мрежа и оточне компензације*, 11. Саветовање CIRED Србија, СТК-5 Р-5.14, Копаоник, 24 – 28. септембар 2018. (М63).
11. Милорадовић С., **Рајић Т.:** *Избор карактеристике рада регулатора напона при отежаним оловима рада и лишим фактором снаге у мрежи средњег напона*, 11. Саветовање CIRED Србија, СТК-3 Р-3.12, Копаоник, 24 – 28. септембар 2018. (М63).
12. Савић М., Таталовић С., **Рајић Т.:** *Координација изолације оклопљеног и гасом изолованог постројења 110 кВ са дугачким кабловским прикључком*, 11. Саветовање CIRED Србија, СТК-2 Р-2.15, Копаоник, 24 – 28. септембар 2018. (М63).

Пред Комисијом формираном од стране Наставно-научног већа Електротехничког факултета, у саставу: др Жељко Ђуришић, ванредни професор, Универзитет у Београду-Електротехнички факултет - председник комисије, др Никола Рајаковић, редовни професор у пензији, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет - члан комисије који није запослен на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, др Зоран Радаковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет - члан комисије, др Златан Стојковић, редовни професор, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет - члан комисије и др Јелисавета Крстивојевић, доцент, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет-члан комисије на јавној усменој одбрани, кандидат је **успешно положио докторски испит, одржан 11.01.2018. године.**

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Кандидат Томислав Рајић поседује адекватан ниво знања из области које представљају основу неопходну за решавање техничких проблема који се третирају у предложеној докторској дисертацији. До сада је публиковао укупно 16 научних чланака. Објавио је 2 научна чланка у међународним часописима са импакт фактором, при чему је садржај једног научног чланка у директној вези са темом докторске дисертације. Положио је све испите на докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду са просечном оценом 9.90. На основу наведених резултата кандидата, наша је процена да је кандидат Томислав Рајић у стању да успешно реализује израду предметне докторске дисертације.

2. Предмет, циљ и значај истраживања

Један од најважнијих елемената електроенергетског система јесте надземни вод. Вод служи за пренос електричне енергије од произвођача до крајњих потрошача. Због тога, заштити водова треба посветити посебну пажњу. Водови нижих напонских нивоа штите се једноставним прекострујним заштитама, док се важни високонапонски водови штите дистантном или диференцијалном заштитом. Дистантна заштита поседује извесне недостатке јер прави системске грешке приликом кварова са луком, као и при осциловању снаге која се преноси водом. Диференцијална заштита нема тих проблема и карактерише је велика брзина реаговања. На једноструким водовима примењује се подужна диференцијална заштита. Због транзијентне стабилности у електроенергетском систему, кварови на водовима у близини

електране или великих чворишта морају се искључивати брзо. Управо за такве водове обавезна је примена подужне диференцијалне заштите.

Принцип рада ове заштите огледа се у поређењу струја на супротним крајевима вода и постојању два диференцијална релеја. Стабилизациона и диференцијална струја су две величине на основу којих се доноси одлука о реаговању релеја.

Код аналогне заштите поређење струја врши се помоћу кабловског пилот вода којим су повезани секундарни струјних трансформатора на крајевима вода. Предности аналогне подужне диференцијалне заштите водова су велика брзина реаговања, једноставност, неосетљивост на осциловање снаге и добра поузданост. Велика мана је обавезно постојање пилот вода чиме је употреба овакве заштите ограничена на водове дужине пар десетина километара. Међутим, појавом OPGW заштитне ужади, дужина вода престаје да буде ограничавајући фактор за примену дигиталне подужне диференцијалне заштите.

Основни алгоритам подужне диференцијалне заштите поседује извесне недостатке. Употреба класичне стабилизације није довољна да би се избегло неселективно реаговање заштите, ако дође до засићења струјних трансформатора приликом квара ван штићене деонице [1]. Засићење узрокује пресликавање струја на секундарну страну које нису верне копије примарних струја. У таквим условима, диференцијална струја може достићи велику вредност и изазвати неселективно реаговање релеја.

Нежељено реаговање може бити резултат још неколико фактора. Дугачки водови за последицу имају велике капацитивне струје одвођења дуж вода и уносе осетну разлику између струја са једне и друге стране вода. Последица тога је повећање диференцијалне струје. Кварови са прелазним отпорностима смањују саму струју квара и утичу на осетљивост диференцијалног релеја [2]. Изоловано звездиште и уземљење преко активне отпорности ради ограничења струје једнофазног кратког споја имају исти ефекат. Средњенапонске мреже обично имају тако реализовано уземљење неутралне тачке, што се одражава на рад диференцијалне заштите [3].

У литератури се помињу различита решења за превазилажење неких од наведених проблема. Два решења се посебно издвајају јер су примењена у пракси. Имплементирана су од стране реномираних произвођача релејне заштите [4, 5]. У основи, алгоритми користе базни принцип диференцијалне заштите. Релевантне величине за рад релеја су диференцијална и стабилизациона струја. Проблеми који могу изазвати спор или неселективан рад, превазилазе се допунским модулима и прорачунима. Међутим, ови прорачуни често су праћени компликованом обрадом сигнала. У сврху овог истраживања, оба алгоритма ће бити имплементирана и тестирана на трофазном моделу далековода, са посебним акцентом на специфичне ситуације када и сами произвођачи релеја не гарантују селективан или довољно брз одзив заштите.

Циљ истраживања, који је предмет докторске дисертације, јесте да се развије нов алгоритам за подужну диференцијалну заштиту далековода који је применљив на дигиталним уређајима. Предвиђено је да алгоритам ради са тренутним вредностима струја и да се избегну компликоване рачунске операције и обраде сигнала. Основни принцип рада диференцијалне заштите био би промењен у смислу што би се уместо стабилизационе струје користила нова рачунска величина. На основу те величине могло би се једноставно и поуздано доћи до информације о смеровима струја на оба краја вода без употребе напонских сигнала [6, 7]. Информација о смеровима добија се множењем одбирака струјних сигнала са оба стране вода, за сваку фазу посебно. Идеја потиче од чињенице да су мерене фазне струје на супротним крајевима вода истог смера при стањима без квара или при квару ван штићене

зоне, односно различитог смера при квару унутар зоне заштите. Множењем струјних сигнала, у првом случају добила би се позитивна вредност, а у другом негативна.

Алгоритам би се састојао од два дела. Један део би посматрао тренутне вредности фазних струја, а други део би био усмерен ка тренутним вредностима нултих компоненти струја. Други део би суштински радио на истом принципу као и први. Разлика би била једино у томе што би се прорачуни вршили са тренутним вредностима нултих компоненти струја. Употребом нултог компонентног система струја повећава се осетљивост и брзина реаговања релеја у мрежама са малим или ограниченим струјама једнофазног кратког споја.

Циљ је да се превазиђу проблеми и унапреде алгоритим и постојеће технике диференцијалне заштите водова. У том погледу, очекује се да предложени алгоритам буде потпуно неосетљив на засићење струјних трансформатора и да има брз одзив у свим ситуацијама и за све врсте кварова унутар зоне заштите.

Значај истраживања може се сагледати и кроз одабране научно-истраживачке радове из ове области, који су публиковани у водећим међународним часописима. Само неки од ових радова су издвојени из предвиђене библиографије ове дисертације и приказани у наставку:

- [1] H. Gao, J. Li, B. Xu, Principle and Implementation of Current Differential Protection in Distribution Networks with High Penetration of DGs, *IEEE Transactions on Power Delivery* 32 (2017) 565-574.
- [2] T. Kawady, A. Talaab, E. Ahmed, Dynamic performance of the power differential relay for transmission line protection, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 32 (2010) 390–397.
- [3] X. Deng, R. Yuan, T. Li, *et al*, Digital differential protection technique of transmission line using instantaneous active current: theory, simulation and experiment, *IET Generation Transmission & Distribution*, 11 (2015) 996–1005.
- [4] SIEMENS: Manual- SIPROTEC- Differential Protection 7UT6x (SIEMENS, June 2012, Version 4.6), pp 105-108.
- [5] ABB: Application manual-Line differential protection RED670 2.1 IEC (ABB, August 2016, Product version 2.1), pp. 142–148.
- [6] Z. Stojanovic, M. Djuric, An algorithm for directional earth-fault relay with novoltage inputs, *Electric Power System Research*, 96 (2013) 144–149.
- [7] T. Rajić, Z. Stojanović, An algorithm for longitudinal differential protection of transmission lines, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, 94 (2018) 276–286.

3. Полазне хипотезе

Полазне хипотезе као предмет истраживања предложене докторске дисертације су:

- Могућност формирања математичког модела електроенергетског система који ће служити за тестирање како новог алгоритма, тако и других решења које користе светски признати произвођачи релејне заштите. Математички модел ће бити формиран тако да што верније прикаже елементе електроенергетског система и промене струја и напона током прелазних процеса приликом кварова.
- Непотребно реаговање подужне диференцијалне заштите може бити изазвано услед различитих утицаја: засићење струјних трансформатора, дугачки водови, прелазна отпорност на месту квара.
- Брзина одзива класичног алгоритма доста зависи од начина уземљења звездишта енергетских трансформатора.
- Предложени алгоритам обезбедиће брз одзив при свим врстама кварова унутар зоне заштите, без обзира на начин уземљења звездишта енергетског трансформатора.
- Нов алгоритам биће селективан у свим ситуацијама које могу изазвати неселективно реаговање класичне подужне диференцијалне заштите.

4. Научне методе истраживања

У овој докторској дисертацији ће доминирати истраживање емпиријске природе и примењеног циља. Основне истраживачке методе, које ће бити коришћене, су: индуктивна метода, метода анализе, компаративна метода, метода доказивања, математичка метода и метода моделовања.

Испитивање алгоритама релејне заштите биће вршено на моделу надземног вода са расподељеним параметрима, који је базиран на Бержероновој методи путујућих таласа. Тренутне вредности електричних сигнала ће бити одређиване нумеричким решавањем система одговарајућих диференцијалних једначина, које описују стања коришћених модела. Временске промене величина од значаја ће бити анализирани у оквиру симулација са контролисаним изменама модела система. Извршавање програмских кодова алгоритама релејне заштите ће се одвијати у реалном времену симулације. Прорачун, обрада и приказ резултата биће извршени применом програмског пакета MATLAB. Прорачун прелазних процеса биће извршен и помоћу софтверског пакета EMTP/ATP.

Верификација новог алгоритма биће остварена на физичком моделу једноструког вода у лабораторијским условима. Такође, алгоритам ће бити тестиран на основу струјних сигнала записаних помоћу релеја који се налазе у погону, тј. биће искоришћени постојећи снимци струјних сигнала при кваровима у реалној мрежи.

5. Очекивани научни доприноси

Очекивани научни доприноси предложене докторске дисертације биће:

- Нови приступ у реализацији дигиталне подужне диференцијалне заштите далековода који ће се заснивати на принципу поређења смера фазних и нултих струја са две стране далековода.

- Једноставност новог алгоритма у поређењу са решењима која се наводе у радовима новијег датума из ове области.
- Елиминисање употребе Фуријеовог филтра у обради сигнала.
- Добијање бржег одзива релеја за кварове унутар зоне заштите у односу на алгоритме које користе реномирани произвођачи релејне заштите.
- Неосетљивост алгоритма у ситуацијама које могу изазвати неселективно реаговање диференцијалне заштите.
- Употребљивост алгоритма и на водовима на којима је примењена техника аутоматског поновног укључења прекидача.

6. План истраживања и структура рада

Основни кораци истраживања у оквиру предложене докторске дисертације биће:

- Упознавање са принципима рада традиционалне диференцијалне заштите далековода.
- Преглед и систематизација најновијих истраживања везаних за подужну диференцијалну заштиту далековода.
- Сагледавање проблема са којима се сусреће подужна диференцијална заштита далековода: амплитудска и фазна грешка струјних трансформатора, засићење струјних трансформатора, дужина вода, синхроно одабирање и прикупљање одбирака сигнала са различитих крајева вода, прелазна отпорност на месту квара, начин уземљења звездишта енергетског трансформатора.
- Развој новог алгоритма за заштиту далековода који ће се заснивати на диференцијалном принципу.
- Формирање модела система применом програмског пакета MATLAB, у којем ће бити симулиран, тестиран и верификован рад новог алгоритма. Такође, тестирање ће бити извршено формирањем модела мреже помоћу софтвера EMTP/ATP.
- Упоредна анализа перформанси новог алгоритма са комерцијалним решењима.
- Верификација новог алгоритма на физичком моделу надземног вода у лабораториским условима и на основу записа релеја који се налазе у погону.

Текст докторске дисертације биће написан на српском језику.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, као и непосредног увида у досадашњи научни рад кандидата Томислав Рајић, мастер инжењера електротехнике, Комисија је закључила да:

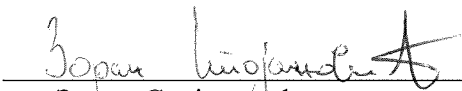
1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању и Статутом Електротехничког факултета Универзитета у Београду за одобрење теме за израду докторске дисертације;
2. Предложена тема „Нови приступ у реализацији подужне диференцијалне заштите надземних водова“ (енг. "New approach in realization of longitudinal differential protection of overhead lines") научно је заснована и припада ужој научној области електроенергетски системи, а резултати до којих ће се доћи израдом ове дисертације представљаће значајан и оригиналан допринос у области предметног истраживања.

Студент докторских студија спроводи истраживања у вези са предложеном темом на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

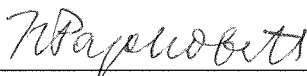
На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да кандидату Томиславу Рајићу одобри израду докторске дисертације под наведеним називом, а под менторством др Зорана Стојановића, ванредног професора Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

У Београду, 14. фебруар 2019.

Чланови комисије

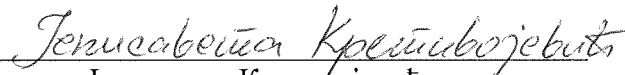

др Зоран Стојановић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Жељко Ђуришић, ванредни професор,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Никола Рајаковић, редовни професор у пензији,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


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


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


др Јелисавета Крстивојевић, доцент,
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет