

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Филипа Зеца

Одлуком бр. 409/21 од 14.03.2023. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Филипа Зеца, под насловом

**„Предикција стања изолационог система високонапонске електроенергетске опреме
применом закона пораста вероватноће”**

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

Филип Зец је 27.10.2014. године уписао докторске академске студије на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на модулу Електроенергетске мреже и системи. Све испите предвиђене наставним планом и програмом докторских студија положио је са просечном оценом 9,6.

Кандидат је 01.10.2020. године пријавио тему докторске дисертације. За ментора је предложен др Јован Микуловић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Комисија за студије трећег степена је 06.10.2020. године разматрала предлог теме за израду докторске дисертације и упутила Наставно-научном већу предлог за именовање Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5046/14-1 од 23.10.2020. године), у саставу:

1. др Милета Жарковић, доцент, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
2. др Ненад Каргаловић, научни сарадник, Универзитет у Београду - Електротехнички институт „Никола Тесла“,
3. др Јован Цветић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
4. др Зоран Лазаревић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
5. др Жељко Ђуришић, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

Јавна усмена одбрана теме докторске дисертације одржана је 23.11.2020. године. Комисија за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације оценила је усмену одбрану предложене теме као успешну (оцена „задовољно“).

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду је 20.01.2021. усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. За ментора дисертације именован је др Јован Микуловић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Веће научних области техничких наука дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (Одлука бр. 61206-850/2-21 од 03.03.2021. године).

Кандидат је 02.03.2023. године предао докторску дисертацију на преглед и оцену. Комисија за студије трећег степена потврдила је 07.03.2023. године испуњеност потребних услова за подношење предлога за формирање Комисије за преглед и оцену докторске дисертације Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Наставно-научно веће Електротехничког факултета Универзитета у Београду именовало је Комисију за преглед и оцену докторске дисертације под насловом „Предикција стања изолационог система високонапонске електроенергетске опреме применом закона пораста вероватноће“ (Одлука бр. 409/21 од 14.03.2023. године), у саставу:

1. др Јован Микуловић, редовни професор, Универзитет у Београду, Електротехнички факултет,
2. др Милета Жарковић, доцент, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
3. др Ненад Карталовић, научни сарадник, Универзитет у Београду - Електротехнички институт „Никола Тесла“,
4. др Јован Цветић, редовни професор, Универзитет у Београду - Електротехнички факултет,
5. др Жељко Ђуришић, Универзитет у Београду – Електротехнички факултет.

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду, члана 74. Статута Универзитета у Београду-Електротехничког факултета и захтева кандидата, одобрено је продужење рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма.

1.2. Научна област дисертације

Дисертација кандидата Филипа Зеца припада научној области Електротехничко и рачунарско инжењерство, ужа научна област Електроенергетски системи, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду. За ментора дисертације одређен је др Јован Микуловић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду, због истакнутих доприноса у ужој области Електроенергетски системи, а посебно у подобласти високонапонског испитивања електроенергетске опреме.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Филип Зец је рођен 27.09.1990. у Београду, Србија. Основну школу „Бранко Радичевић“ и Девету гимназију „Михаило Петровић Алас“ је завршио у Београду. Електротехнички факултет у Београду уписао је 2009. године. Дипломирао је 2013. године на Одсеку за Енергетику, на смеру Енергетски претварачи и погони, на тему „Интегрисани систем генераторског прекидача и оклопљених генераторских сабирница“. На истом факултету завршава мастер студије на смеру Електроенергетски системи, на тему „Мониторинг и дијагностика, кварови и поправке изолационих система намотаја ротора великих

турбогенератора“. Докторске студије на Електротехничком факултета Универзитета у Београду уписао је 2014. године на модулу Електроенергетске мреже и системи. Положио је све испите и испунио је све обавезе прописане студијским програмом сакупивши предвиђених 120 ЕСПБ. Од 2013. до 2017. године је радио у *FIMEL Company d.o.o.*, на развоју, конструкцији и реализацији проводних изолатора и растављача-уземљивача за високонапонско напајање електростатичког филтера, као и на развоју и конструкцији спрежне јединице за мониторинг парцијалних пражњења на великим обртним машинама. Године 2017. прелази да ради у Електротехнички институт „Никола Тесла“ као стручни сарадник и истраживач приправник на развоју и имплементацији комплетног система за магнетни мониторинг и мониторинг парцијалних пражњења на генераторима, као и на формирању и опремању високонапонске лабораторије за високонапонска испитивања код развоја нових производа.

Истраживачким радом се бави у области високонапонских испитивања, испитивања парцијалних пражњења, као и применом статистичких метода на процену стања изолације на електроенергетским објектима. Све поменуте активности базирају се на раду у лабораторији и на терену, применом стандардизованих, акредитованих метода и техника мерења. Неки од резултата истраживачког рада су публиковани на домаћим и међународним конференцијама, као и у научним часописима. Додатна усавршавања стекао је на међународним курсевима компаније *Omicron Energy* у Аустрији у области парцијалних пражњења на високонапонској електроенергетској опреми.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација је по форми и структури у потпуности усклађена са Упутством о облику и садржају докторске дисертације која се брани на Универзитету у Београду. Докторска дисертација је написана на српском језику, латиничним писмом, и има укупно 143 стране. Садржи 71 слику, 13 табела, 39 нумерисаних и 96 ненумерисаних једначина, као и 67 библиографских референци. Делови дисертације су:

- Насловна страна на српском језику
- Насловна страна на енглеском језику
- Страна са информацијама о ментору и члановима комисије
- Страна са подацима о докторској дисертацији на српском језику
- Страна са подацима о докторској дисертацији на енглеском језику
- Садржај
- Текст рада по поглављима:
 1. Увод
 2. Чврсти високонапонски изолациони материјали
 3. Електричне особине чврстих високонапонских изолационих материјала
 4. Електрична пражњења код изолационих система
 5. Изолациони системи електроенергетске опреме
 6. Статистичка обрада и анализа резултата
 7. Закон пораста вероватноће и моделовање
 8. Животни век високонапонских изолационих система
 9. Испитивања, резултати и анализе
 10. Закључак
- Списак коришћене литературе
- Прилози
- Биографија аутора
- Изјава о ауторству

- Изјава о истоветности штампане и електронске верзије докторског рада
- Изјава о коришћењу.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Прво поглавље представља уводно поглавље и даје основне информације о циљевима и обиму тезе, о непосредном значају и актуелности истраживања, о мотивацији за истраживања, као и очекиваним доприносима.

У другом поглављу дат је увод о изолационим системима са чврстом изолацијом, извршена је класификација чврстих изолационих материјала. Описана је њихова хемијска структура, начин производње и изолациона својства релевантна за предметно истраживање.

У трећем поглављу су приказане најзначајније релевантне величине које карактеришу диелектричне (изолационе) материјале а посебно електричне особине чврстих изолационих материјала.

У четвртном поглављу су описана пражњења код изолационих система односно парцијална пражњења и пробој. Детаљно су приказана парцијална пражњења, њихови параметри, модели и типови. Извршена је подела електричних пробоја (унутрашњи електронски пробој, електромеханички пробој, жбунасти пробој, пробој пузном стазом, електротермички пробој и електрохемијски пробој).

У петом поглављу су приказани истраживани високонапонски изолациони системи електроенергетске опреме за обртне машине и каблове. Дат је приказ релевантних података који се односе на технологију израде изолационих система, њихову конструкција и особине релевантне за дата истраживања пораста вероватноће исхода (пробоја или прага парцијалних пражњења) и механизме старења.

Шесто поглавље се бави анализом резултата односно статистичком обрадом. Дат је приказ поступака обраде и анализе резултата испитивања. Описане су најчешће коришћене функције расподеле у електротехници, тестови за испитивање хипотеза расподеле и методе процене параметара расподеле.

У седмом поглављу је дато извођење закона пораста одређеног исхода у складу са датим истраживањима, односно дат је начин моделовања електроизолационог система. Након истраживања, акценат је стављен на Вејбулову тропараметарску расподелу која даје најбоље резултате у моделовању датих величина (праг напона парцијалних пражњења и пробој).

Осмо поглавље обрађује тему различитих врсте старења, односно тему узрочно последичних веза. Дат је преглед различитих утицаја старења као и синергистичко деловање више утицаја старења на изолациони систем електроенергетске опреме. Такође, представљене су методе процене преосталог животног века електроизолационог система.

У деветом поглављу су дате поставке више врста експеримената који се односе на моделовање појединих изолационих система односно примену закона пораста вероватноће као и експерименти везани за испитивање преосталог животног века. Дат је начин на који су изведена испитивања на одабраним системима узорака (обртне машине, каблови), коришћена мерна опрема и процедуре и стандарди по којима су експерименти извођени. Дати су оригинално развијени нумерички алгоритми за статистичку обраду експерименталних резултата добијених за утврђивање закона пораста вероватноће за одређени исход као и за процену века трајања изолационог система. У поглављу су приказани резултати обраде експерименталних података добијених применом развијених алгоритмима.

У десетом поглављу дат је закључак у којем су сажето приказани сви важнији резултати истраживања у оквиру докторске дисертације, као и главни доприноси дисертације у вези са утврђивањем важења закона пораста вероватноће исхода у циљу предикције стања

изолационог система високонапонског објекта на основу испитивања репрезентативних узорака, као и процену преосталог животног века. Такође, дати су предлози за даља истраживања у ово области.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација под насловом „Предикција стања изолационог система високонапонске електроенергетске опреме применом закона пораста вероватноће” представља оригиналан научноистраживачки рад, који је настао као резултат вишегодишњих истраживања кандидата и практичних искустава у области испитивања и дијагностике стања високонапонских електроизолационих система.

Тема је актуелна и у складу је са савременим трендовима повећања ефикасности високонапонске технике кроз повећање густине снаге по јединици масе и/или јединици запремине, односно кроз повећање радног напона и смањење габарита високонапонских јединица. У сагласности са тиме је и тренд захтева за продужење животног века високонапонских јединица, при чему се затева подизање поузданости и расположивости. Дисертација се бави изолационим системима као кључним елементом развоја нових решења високонапонске опреме у смислу пројектовања, испитивања, дијагностике и одржавања.

У дисертацији су представљени оригинални нумерички алгоритми за обраду експерименталних резултата. Статистичка обрада се односи на утврђивање припадања резултата испитивања узорака једном статистичком скупу, утврђивању закона пораста вероватноће одређеног исхода на скалираним узорцима (моделима) изолационог система и реалним објектима. Приликом испитивања поменутих модела и узорака, алгоритам дефинише закон пораста вероватноће за праг напона парцијалних пражњења и пробојни напон што резултује не само у предикцији стања електроизолационог система већ и процену преосталог животног века високонапонског објекта.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације, кандидат је детаљно истражио релевантну литературу из научне области којом се бави дисертација. Литература наведена у дисертацији броји 67 библиографских јединица, на основу чега се може закључити да је кандидат остварио темељан увид у резултате досадашњих истраживања у предметној научној области. У оквиру наведене литературе налазе се и кандидатови радови који су публиковани у међународном часопису са SCI листе и на међународној конференцији, а који су проистекли из рада на докторској дисертацији или су у директној вези са темом дисертације.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Истраживање је засновано на теоријским, експерименталним, емпиријским и математичким методама. Прегледом доступне научне литературе из релевантне области и сродних области дошло се до аналитичко-дедуктивних закључака о формирању одговарајућих физичких (експерименталних) и математичко-статистичких модела за даље истраживање. Експериментални поступак спроведен је под добро контролисаним лабораторијским условима. Физички модели и узорци су репрезентативног карактера за модуле (делове) високонапонске изолације код неколико врста високонапонских обртних машина и кабловских система. Све методе испитивања су у складу са важећим релевантним стандардима. Емпиријски поступак истраживања је спроведен на експлоатационим подацима доступним из литературе, база података, експертиза и студија случаја. Сви добијени подаци су анализирани и обрађени математичко-статистичким поступцима. Обрадом резултата

дошло се до заједничких групних параметара који карактеришу неке особености изолационог система сагласно закону пораста вероватноће за посматану величину. Након извршених истраживања сви резултати су подвргнути експертизи и тумачењу научно-стручним методама.

3.4. Применљивост остварених резултата

Резултати остварени у оквиру изведених истраживања доприносе унапређењу метода и поступака испитивања и дијагностике изолационих система високонапонских објеката, односно доприносе поузданијој предикцији стања и преосталог животног века.

Такође, доказана је поузданост испитивања на адекватним моделима изолационог система како би се превазишла нека од ограничења деструктивних испитивања високонапонских изолационих система. Са друге стране, примена закона пораста вероватноће исхода на адекватним узорцима је знатно економичније у односу на испитивање прототипа или делова реалног високонапонског објеката у фази развоја производа.

Посредни значај истраживања у оквиру докторске дисертације је што примена резултата истраживања даје могућност уштеде времена и средстава и у финансијским ефектима током производње и експлоатације високонапонских објеката.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самосталан научни рад

Филип Зеџ је током докторских студија, као и током целокупног досадашњег рада, показао све особине неопходне за самосталан научноистраживачки рад. Као првоименовани аутор кандидат је публиковао два рада у врхунским међународним часописима М21, један рад на међународној конференцији и више радова на националним скуповима (М63).

Начин на који је написана докторска дисертација и научни доприноси који су у њој представљени потврђују спремност кандидата за самосталан научни рад, почевши од систематичног прегледа доступне литературе, преко уочавања недостатака и ограничења постојећих метода, до развоја методологије која превазилази уочене недостатке. Научни рад кандидата одликује темељан и систематичан приступ решавању научних проблема.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОСИ

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Најзначајнији научни доприноси коју су остварени у оквиру докторске дисертације огледају се у следећем:

- утврђивање репрезентативних величина и параметара диелектричних карактеристика реалног изолационог система (или једног његовог модула) који се могу реализовати на n пута умањеним моделима сагласно закону пораста вероватноће исхода;
- теоријски и експериментално је доказано да модел треба да репрезентује изолационо најслабији део система или модула као и важење закона пораста вероватноће исхода уз примену Вејбулове расподеле;
- утврђивање елемената статистичке анализе експлоатационих података (времена и типа напрезања) као и резултата експерименталних испитивања на репрезентативном скупу изолационих система помоћу којих се изналази статистичка расподела која показује очекивани преостали век изолационог система;

- израда нумеричког алгоритма за испитивање припадности испитиваних узорака једног типа јединственом статистичком узорку;
- израда алгоритма за обраду експерименталних резултата за утврђивање параметара статистичких расподела код примене закона пораста вероватноће исхода на скалираним моделима изолационог система као и начин предикције стања ралних изолационих система;
- израда алгоритма за обраду експерименталних резултата за утврђивање параметара статистичких расподела код процене преосталог животног века изолационог система.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања спроведена у оквиру дисертације захтевала су анализу релевантне научно-стручне литературе, примену метода математичког моделовања и статистичке анализе везане за истраживање закона пораста вероватноће исхода, као и испитивање парцијалних пражњења, диелектричне чврстоће и других величина. Кандидат је извршио анализу релевантних доминантних процеса у изолационог систему високонапонских објеката приликом експлоатације и испитивања који доводе до парцијалних пражњења или пробоја, као и анализу процеса и законитости старења изолације. Кандидат је развио оригиналне алгоритме за примену закона пораста вероватноће за одређени исход, као и за процену века трајања изолационог система високонапонских објеката. Кандидат је конципирао адекватне експерименталне поступке који омогућују израду одговарајућих модела изолационог система у складу са захтевима развијених алгоритама.

Сагледавањем постављених циљева истраживања, полазних хипотеза и остварених резултата, Комисија закључује да је кандидат Филип Зец успешно одговорио на сва релевантна питања из области која је предмет докторске дисертације. Комисија констатује да су научни доприноси остварени у докторској дисертацији објављени у релевантном међународном часопису *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, чиме је потврђено да се истраживањима у оквиру дисертације дошло до нових сазнања и резултата који до сада нису били публиковани.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Филип Зец је објавио 11 радова, од којих 2 рада у међународним часописима са SCI листе. Као првоименовани аутор кандидат је из области којом се бави дисертација публиковао један рад у међународном часопису са SCI листе и један рад на међународној конференцији. Такође је публиковао 8 радова у зборницима скупова националног значаја.

Научни доприноси који представљају резултат истраживања у оквиру докторске дисертације публиковани су у једном раду у врхунском међународном часопису (M21), у једном раду на међународној конференцији (M33) и у три рада у зборницима скупова националног значаја (M63). Списак радова је дат у наставку, при чему су звездицом означени радови који су проистекли из истраживања у оквиру докторске дисертације.

Категорија M21:

- [1]* Filip Zec, Nenad Kartalović i Tomislav Stojić, Prediction of high-voltage asynchronous machines stators insulation status applying law on increasing probability, *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* Volume 123, Decembar 2020, 106331, IF2021: 5.659;
<https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2020.106331>

- [2] Filip Zec, Jasna Dragosavac i Miloš Radović, In-situ post-assembly magnetization of large rare-earth permanent-magnet machines, International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 129, Jul 2021, 106860, IF2021: 5.659; <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2021.106860>

Категорија М33:

- [1]* Filip Zec, Jovan Mikulović, Ana Milošević, Srđan Milosavljević i Nenad Kartalović, Diagnostics of Failure and New Design of HV Electrostatic Filter Disconnecter in TPP, CIGRE South East European Regional Council Conference 2022 Vienna, Austria

Категорија М63:

- [1]* Филип Зец, Јован Микуловић, Ненад Карталовић и Ана Милошевић, Испитивање парцијалних пражњења на средњенапонским гасом изолованим постројењима, 12. саветовање CIREД, 2021
- [2]* Филип Зец, Ненад Карталовић и Миладин Јурошевић, Применљивост закона о повећању вероватноће за предвиђање стања изолације статора високонапонских асинхронних машина, 14. савјетовање БХ К/О CIGRE, Неум, 20.10. до 23.10.2019.
- [3]* Филип Зец и Ненад Карталовић, Закон пораста вероватноће пробоја у ВН техници, 34. саветовање CIGRE Србија, Врњачка Бања, 02.06. до 06.06.2019.
- [4] Филип Зец, Ненад Карталовић, Бојан Радојичић и Марко Цвијановић, Поређење *online* и *offline* метода за мерење парцијалних пражњења на великим генераторима, 34. саветовање CIGRE Србија, Врњачка Бања, 02.06. до 06.06.2019.
- [5] Филип Зец, Ненад Карталовић, Систем за *online* мониторинг међунавојне изолације намотаја ротора турбогенератора, 33. саветовање CIGRE, Златибор 5-8 јун 2017.
- [6] Филип Зец, Ненад Карталовић, Спрежна јединица за *online* мониторинг парцијалних пражњења великих обртних машина, 33. саветовање CIGRE, Златибор 5-8 јун 2017.
- [7] Филип Зец, Марцин Орзлек, Ненад Карталовић, Љубиша Михаиловић, Бојан Радојичић и Марко Цвијановић, Мониторинг магнетног поља ротора турбогенератора, пример откривања и поправке међунавојног споја намотаја ротора, 32. саветовање CIGRE, Златибор 17-21 мај 2015.
- [8] Милорад Опачић, Љубиша Михаиловић, Предраг Васић, Михаило Ђорђевић, Милорад Поповић, Филип Зец, Интегрисани систем генераторског прекидача и оклопљених генераторских сабирница, 31. саветовање CIGRE, Златибор 26-30 мај 2013.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата Филипа Зеца под насловом „Предикција стања изолационог система високонапонске електроенергетске опреме применом закона пораста вероватноће” у целини је написана у складу са образложењем наведеним у пријави теме и испуњава све суштинске и формалне услове предвиђене Законом о високом образовању, као и прописима Универзитета у Београду и Електротехничког факултета.

У докторској дисертацији је развијен и верификован оригинални експериментално-нумерички алгоритам који омогућава да се испитивањем на моделу процени стање изолационог система високонапонских објеката. Сви добијени резултати и закључци су експериментално верификовани на изолационим системима обртних машина и каблова. У дисертацији је дат допринос за унапређење поузданости и расположивости високонапонских објеката, као и за продужење животног века високонапонских изолационих система.

Докторска дисертација кандидата Филипа Зеца представља резултат вишегодишњег истраживачког рада у области испитивања и дијагностике стања високонапонских електроизолационих система. Научне доприносе који представљају резултат истраживања у оквиру докторске дисертације кандидат је публикувао као првоименовани аутор у једном раду у врхунском међународном часопису и у једном раду на међународној конференцији. На основу увида у докторску дисертацију и објављене радове кандидата, Комисија закључује да докторска дисертација представља оригиналан и савремен научни допринос.

Током израде докторске дисертације, као и током целокупног трајања докторских студија, кандидат Филип Зец је показао склоност ка научноистраживачком раду и способност за самосталан научноистраживачки рад. Комисија констатује да је кандидат Филип Зец, мастер инжењер електротехнике и рачунарства, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Имајући у виду наведено, Комисија са задовољством предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом „Предикција стања изолационог система високонапонске електроенергетске опреме применом закона пораста вероватноће” кандидата Филипа Зеца изложи на увид јавности, прихвати и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

У Београду, 28. 04. 2023. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ



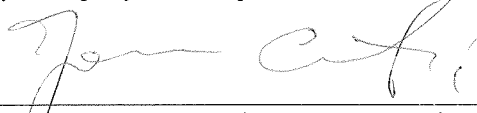
Др Јован Микуловић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Милета Жарковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Ненад Карталовић, научни сарадник
Универзитет у Београду - Електротехнички институт „Никола Тесла“



Др Јован Цветић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



Др Жељко Ђурић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет