

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Уроша Радомана

Одлуком Наставно-научног већа на 884. седници одржаној дана 14.03.2023. (одлука бр. 409/24 од 14.03.2023. године), именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата Уроша Радомана под насловом

Унапређење детаљног термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена

Након 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

Кандидат Урош Радоман уписао је докторске студије 24.10.2014. године на Електротехничком факултету Универзитета у Београду.

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

Кандидат је 23.06.2022. године пријавио тему за израду докторске дисертације под насловом „Унапређење детаљног термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена“.

Комисија за студије трећег степена разматрала је 29.06.2022. године предлог теме за израду докторске дисертације и упутила предлог Комисије за оцену подобности теме и кандидата на усвајање Наставно-научном већу Електротехничког факултета.

Наставно-научно веће је именovalo Комисију за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације (Одлука бр. 5017/14-1 од 14.07.2022. године) у саставу:

1. др Зоран Лазаревић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
2. др Мирко Коматина, редовни професор (Универзитет у Београду – Машински факултет),
3. др Милета Жарковић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
4. др Младен Терзић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет) и
5. др Богдан Брковић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Кандидат је 14.07.2022. године обавио јавну усмену одбрану теме докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета је на седници одржаној 19.09.2022. године усвојило Извештај Комисије за оцену услова и прихватање теме докторске дисертације. За ментора дисертације именован је др Зоран Радаковић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације (број 61206-4051/2-22 од 10.10.2022. године).

Кандидат је 02.03.2023. предао докторску дисертацију на преглед и оцену.

Након разматрања образложења и молбе кандидата да се два рада на којима кандидат није првопотписани аутор (један рад има 3 коаутора, а један 4 коаутора) прихвате као квалификациони рад (потребан један рад) за израду докторске дисертације, као и суштинског образложења доприноса кандидата у научним радовима који су предложени као квалификациони за израду докторске дисертације, које је дао ментор, комисија за студије трећег степена 07.03.2023. године дала је Наставно-научном већу Електротехничког факултета предлог именовања Комисије за преглед и оцену докторске дисертације. Допунски материјал садржи и писмене сагласности коаутора да Урош Радоман искористи два предметна рада као квалификациони рад за израду докторске дисертације.

Наставно-научно веће Факултета именovalo је Комисију за оцену докторске дисертације (број одлуке 409/24 од 14.03.2023. године) у саставу:

1. др Зоран Радаковић, редовни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
2. др Зоран Лазаревић, редовни професор у пензији (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет),
3. др Мирко Коматина, редовни професор (Универзитет у Београду – Машински факултет),
4. др Милета Жарковић, доцент (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет) и
5. др Младен Терзић, ванредни професор (Универзитет у Београду – Електротехнички факултет).

1.2. Научна област дисертације

Докторска дисертација Уроша Радомана под насловом „Унапређење детаљног термохидрауличног модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена“ припада научној области електротехника и рачунарство, ужој научној области Енергетски претварачи и погони, за коју је матичан Електротехнички факултет Универзитета у Београду.

Ментор докторске дисертације је др Зоран Радаковић, редовни професор Електротехничког факултета Универзитета у Београду. Професор др Зоран Радаковић се дуги низ година бави научноистраживачким радом у области енергетских претварача и погона (доминантно енергетским трансформаторима и преносом топлоте у електроенергетици), што је потврђено релевантним радовима, посебно у ужој области којој припада тема ове дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Урош Н. Радоман, рођен је 17. 6. 1987. у Београду, СР Србија, СФРЈ.

Основну школу „Ђуро Стругар“, на Новом Београду, завршио је школске 2001/2002. године као носилац Вукове дипломе. Земунску Гимназију завршио је школске 2005/2006 са одличним успехом. Упоредно је завршио нижу и средњу музичку школу „Коста Манојловић“ у Земуну.

Електротехнички факултет Универзитета у Београду уписао је школске 2006/2007. године. Дипломирао је октобра 2012. године, на смеру Енергетски претварачи и погони, са просечном оценом 8,74. Дипломски рад „Пројектовање машина за обновљиве изворе енергије“ (ментор проф. др Слободан Вукосавић) одбранио је са оценом 10.

Мастер студије уписао је школске 2012/2013. године, на модулу Енергетски претварачи и погони. Мастер студије завршио је септембра 2014. са просечном оценом 9,83. Мастер рад „Моделовање прелазних термичких процеса код енергетских уљних трансформатора са регулатором напона“ (ментор проф. др Зоран Радаковић) одбранио је са оценом.

Докторске студије уписао је школске 2014/2015. године, на модулу Енергетски претварачи и погони. Положио је све испите на докторским студијама, са просечном оценом 10: 1) Прелазне појаве у електричним машинама, 2) Одабрана поглавља из специјалних електричних инсталација, 3) Електрични сервомотори, 4) Математичко моделирање у електротермији, 5) Метода коначних

елемената у електромагнетици, 6) Интеграција електромоторних погона у сложене системе покретања и управљања, 7) Електромагнетни прелазни процеси у електроенергетским системима, 8) Енглески језик, 9) Позитивни ефекти употребе бентонита у системима уземљења, 10) Математичко моделовање физичко-техничких процеса.

Коаутор је 5 радова у међународним часописима са SCI листе, 8 радова на међународним конференцијама и 6 радова на домаћим конференцијама.

Од 2013. до 2022. године био је запослен као истраживач на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на пројекту технолошког развоја TP33024 Министарства просвете, науке и технолошког развоја и на основу уговора 451-03-68/2022-14/200103 са Министарством просвете, науке и технолошког развоја.

Од новембра 2022. године запослен је као стручни сарадник на Електротехничком институту „Никола Тесла“ Универзитета у Београду, на пројекту Министарства науке, технолошког развоја и иновација Републике Србије (уговор 451-03-47/2023-01/200038).

Његов истраживачки рад усмерен је на моделовање термичких процеса у енергетици, пре свега на развој детаљног термо-хидрауличног модела енергетских трансформатора и рачунарског програма заснованог на овом моделу. Такође, бавио се истраживањима на тему анализе и прорачуна расподеле електромагнетског поља и губитака у енергетским трансформаторима, као и FEM/CFD анализом топлотних и електромагнетских појава. Осим тога, у току истраживања и студија бавио се и обновљивим изворима енергије, енергетском електроником и квалитетом електричне енергије. Учествовао је у више научних и комерцијалних пројеката у земљи и иностранству.

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација под називом „Унапређење детаљног термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена“ написана је на 167 стране (182 страна са прилозима), организована је у 10 поглавља, садржи 127 слика, 37 табела и листу од 123 референци. Наслови поглавља су:

1. Увод,
2. Енергетски трансформатор,
3. Загревање и хлађење енергетских уљних трансформатора,
4. Основе детаљног термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора,
5. Старење папирне изолације ЕУТ и студија заснована на експерименталним истраживањима,
6. Врућа тачка (*hot-spot*) намотаја енергетских уљних трансформатора, дефиниција и декомпозиција,
7. Унапређење модела елемената ДТХМ,
8. Повећање ефикасности хлађења намотаја усмеравањем протока уља кроз радијалне канале,
9. Метода за прорачун фактора задржања *shell-and-tube* размењивача топлоте код трансформатора са ODWF хлађењем и
10. Закључак.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У првом поглављу дефинисани су предмет и циљ истраживања. Наглашена је незаменљива улога енергетских трансформатора у савременим електроенергетским системима, њихова висока цена и важност да се осигура трајан и исправан рад ових уређаја. Основна тема дисертације је термички аспект рада енергетских трансформатора, тачније оних енергетских трансформатора код којих се као изолациони и расхладни флуид користи трансформаторско уље. Предочена је актуелност и значај теме у индустрији трансформатора и у електропривреди. Указано је на основне проблеме термичког

моделовања енергетских уљних трансформатора, и извршен преглед метода термичких прорачуна које се данас користе у пројектантској пракси. На крају поглавља изложени су циљеви спроведених истраживања, као и преглед структуре саме дисертације.

У другом поглављу изложени су принципи рада енергетских трансформатора, механизми генерисања електромагнетских губитака, и описана су савремена конструкцијска решења појединих делова енергетских трансформатора. Тежиште приказа принципа рада и конструкције је стављено на енергетске уљне трансформаторе.

Треће поглавље представља детаљнији уводни део оријентисан ка предмету истраживања докторске дисертације. Приказан је поједностављени термички модел енергетских уљних трансформатора, који обухвата основне компоненте пораста температуре у њима. Приказане су технике мерења температуре.

Четврто поглавље посвећено је детаљном термо-хидрауличком моделу. Модел је најпре упоређен са другим методама за термички прорачун енергетских уљних трансформатора. Изложене су физичке основе модела, након чега су илустровани његови поједини детаљи, неопходни за боље разумевање истраживања спроведених у докторату, која су приказана у наредним поглављима.

У петом поглављу третиран је проблем старења папирне изолације, на који доминантан утицај има промена температуре најтоплије тачке намотаја током рада трансформатора на мрежи. Дат је преглед механизма старења, законитости по којима се оно одвија и параметара чијим се посматрањем може одредити стање (остарелост и преостали животни век) папирне изолације. У овом поглављу се приказују први резултати истраживања у докторској дисертацији: резултати дугогодишње експерименталне и теоријске анализе у оквиру студије испитивања утицаја температуре и садржаја влаге у уљу на динамику старења, рађене за потребе Електропривреде Србије. Истраживања су обухватила захтевне и скупе експерименте на два специјално конструисана и израђена трансформатора снаге 300 kVA.

У шестом поглављу објашњена је декомпозиција једног од најважнијих елемената у традиционалном термичком моделу енергетских уљних трансформатора – фактора најтоплије тачке, познатом по енглеском термину *hot-spot factor*. Кроз пример реалног трансформатора анализиран је утицај различитих физичких појава на положај и вредност највише температуре намотаја и вредност фактора најтоплије тачке.

Седмо поглавље садржи приказ унапређења модела две компоненте термо-хидрауличног модела, за које постојећи математички модели нису били адекватни. Прво побољшање се односи на аналитичке функције за описивање локалног пада притиска у глави радијатора, засноване на резултатима експеримената извршених на експерименталном моделу расхладног система реалне величине. Експерименти су рађени у фабрици Тамини у Италији. Друго побољшање се односи на успостављање аналитичких израза за коефицијенте преласка топлоте струјањем на површима проводника према радијалним каналима за хлађење за случај када не постоје елементи за усмеравање уља кроз радијалне уљне канале. Једначине су изведене полазећи од скупа рачунарских симулација коришћењем програма заснованих на FEM/CFD, а њихова тачност верификована је на резултатима мерења на експерименталном моделу, објављених у литератури.

У осмом поглављу, на основу симулација рачунарским програмом заснованим на детаљном термо-хидрауличком моделу, извршено је поређење карактеристичних хидрауличких и термичких параметара за различите конструкције намотаја трансформатора (са и без усмеравања уља у радијалне канале за хлађење). У прорачунима су коришћене нове једначине за прорачун коефицијента преласка топлоте струјањем, које су дате у поглављу 7.

У деветом поглављу представљена је нова метода за процену фактора запрљања трансформаторских хладњака уље-вода типа *shell-and-tube*. Метода се базира на резултатима мерења која се стандардно спроводе у системима за надзор великих трансформатора са овим типом хладњака. Метода је развијена и верификована на бази података измерених на трансформаторима ХЕ Ђердап I (снага 420 MVA, хлађење компактним хладњацима уље / вода, режим хлађења ODWF). Метода је намењена континуираном праћењу развоја запрљања хладњака и планирању производње електричне енергије и одржавања (чишћења хладњака). Примена модела представља искорак у употреби термо-хидрауличких модела енергетских уљних трансформатора у области експлоатације уређаја (метода је првенствено намењена корисницима трансформатора), насупрот досадашње праксе где су се комплекснији модели готово искључиво користили у области пројектовања нових уређаја (користили су их претежно произвођачи).

У закључку су сумирани резултати истраживања, остварени доприноси и правци потенцијалних даљих истраживања, чији је крајњи циљ што тачније и поузданије термичко моделовање и његова

примена у пракси пројектовања и експлоатације енергетских уљних трансформатора. Теме спроведених и потенцијалних даљих истраживања су у складу са савременим трендовима у овој области, пре свега у стварању дигиталних близанаца (*digital twin*) електричних уређаја.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Цивилизацијски тренд „дигитализације“ подразумева и прављење прецизних математичких модела електричне опреме и предвиђање њихових карактеристика и понашања у погону. У случају конкретне теме дисертације, то значи одређивање критичних температура. Вредност ових температура проверава се у току стандардизованих примопредајних испитивања током којих посматране температуре морају да буду мање од гарантованих, али и одређивање критичних температура током рада трансформатора на мрежи при променљивом оптерећењу и температури расхладног флуида. Добри математички модели омогућавају прецизно предвиђање температуре. Употреба ових модела омогућава да се смање габарити уређаја, приликом чега критичне температуре неминовно прилазе ближе дозвољеним вредностима, али без ризика од оштећења трансформатора или скраћења његовог животног века. Због тога постоји велики практичан интерес за развојем рачунарских алата за симулацију рада трансформатора. Поред општег актуелног тренда дигитализације, интерес за прецизним прорачунима је постојао и раније, поготову у периодима пораста цена материјала – бакра, магнетних лимова и трансформаторских уља, који чине доминантан део масе енергетских трансформатора, чији габарити, маса и цена могу бити јако велики. Примена поједностављених математичких модела, што је била реалност у класичној инжењерској пракси, неминовно захтева увођење сигурносних маргина при прорачуну, чија је крајња последица већи утрошак материјала, а тиме и повећан габарит, тежина и производна цена трансформатора.

У случају термичког моделовања енергетских уљних трансформатора, стручна и академска јавност термо-хидраулички модел препознају као оптимални приступ. Рачунарски алати базирани на овом моделу су углавном развијани унутар компанија највећих светских произвођача, и слабо су доступни у варијанти комерцијално доступних софтвера. Разлози су што је њихова имплементација захтевна, пре свега у смислу решавања система нелинеарних хидрауличких и термичких једначина модела. То значи да је потребно значајно знање и време за реализацију оваквог софтвера. Са друге стране, за прављење оваквих софтвера је неопходно познавати практичне детаље конструкције, што је у великој мери пословна тајна произвођача трансформатора. Ово представља озбиљно ограничење за добре теоријске познаваоце хидрауличких и термичких појава, јер је поред теорије потребно добро познавање детаља конструкције унутар трансформатора, како би софтвер омогућио пројектанту задавање различитих реалних конструкција. Коначно, велике компаније које су имале довољно развојног капацитета да направе такве инжењерске алате, немају интереса да такве алате понуде другим произвођачима, јер би тиме смањили своју компаративну предност. За разлику од стационарних детаљних термо-хидрауличких модела, на које се односи претходни текст у овом пасусу, динамички детаљни термо-хидраулички модели, намењени примени за надзор и доношење одлука од стране оператора електроенергетског система, још су ређи. Може се рећи да је реализација детаљних термо-хидрауличких модела и њихова примена у инжењерској пракси практично ограничена на примену у процесу пројектовања, односно да је њихова употреба у анализи прелазних топлотних процеса, који се јављају током рада трансформатора на мрежи, у самом повоју. Примена динамичких метода термичких прорачуна је актуелизована развојем *smart grid* и има потенцијал да постане веома корисна функционалност *smart grid*-а.

Имајући ово у виду, закључујемо да се дисертација бави техничким проблемом највише актуелности у области трансформаторског инжењеринга. Основни доприноси дисертације су у аспектима повећања укупне тачности модела кроз побољшање модела његових појединих елемената и у проширењу спектра примене ДТХМ. Дисертација се не бави развојем транзијентног детаљног термо-хидрауличког модела, али даје једну методу која се заснива на упрошћеном моделовању прелазних процеса, који је довољно добар за постављени циљ детекције нивоа запрањања хладњака, а на основу њега и предвиђања краткорочне и дугорочне производње и планирања одржавања трансформатора, односно чишћења компактног хладњака.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Дисертација садржи листу од 123 референце. Референцирани су савремени научни радови и најквалитетнији уџбеници из области којом се бави дисертација, као и општа литература из области хидраулике, преноса масе и топлоте и пројектовања енергетских уљних трансформатора. Такође, на списку референци нашли су се важећи међународни стандарди, као и старија, већ класична, литература, у којој постоји квалитетан приказ физичких принципа и основа конструкције и пројектовања.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

Методологија истраживања садржи следеће елементе:

- Преглед и анализа литературе и савремених истраживања из области термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора, запрљања размењивача топлоте и старења чврсте изолације, као и опште литературе уљне хидраулике, преноса топлоте и пројектовања и конструкције енергетских трансформатора. Пажња је посвећена и релевантним важећим међународним стандардима.
- Осмишљавање и спровођење експерименталних истраживања пада притиска у главама радијатора, анализа резултата експеримената и формирање математичких израза који описују падове притиска.
- Осмишљавање и спровођење експерименталних истраживања старења изолације, анализа резултата експеримената и формирање математичких израза корелације индекса полимеризације и садржаја фурана и воде у уљу.
- Анализа резултата мерења електричних и неелектричних величина трансформатора током огледа загревања трансформатора и у погону, са циљем процене могућности повећања оптерећења трансформатора.
- Рачунарска симулација расподеле магнетског поља и губитака у проводницима помоћу програма заснованих на FEM.
- Рачунарска симулација термичких процеса енергетских уљних трансформатора помоћу програма заснованог на детаљном термо-хидрауличком моделу.
- Рачунарске симулације преноса топлоте и масе у рачунарском програму заснованом на FEM/CFD, анализа резултата симулација и дефинисање формула за одређивање коефицијената преласка топлоте струјањем у радијалним каналима намотаја без усмеравања уља.
- Интеграција математичких модела (за локалне падове притиска у глави радијатора и за коефицијенте преласка топлоте струјањем са радијалних површина трансформаторских намотаја у каналима без усмереног струјања уља) у рачунарски програм заснован на детаљном термо-хидрауличком моделу енергетских уљних трансформатора.
- Верификација резултата симулација термичких процеса помоћу рачунарског програма заснованог на детаљном термо-хидрауличком моделу поређењем са резултатима сопствених експеримената и експеримената објављених у литератури.
- Анализа величина мерених у току дугогодишњег рада трансформатора на мрежи и развој методе за процену интензитета запрљања трансформаторских хладњака, као и методе за аналитичку процену интензитета запрљања у будућности.

3.4. Применљивост остварених резултата

Са теоријског становишта значајна је спроведена декомпозиција *hot-spot factor*-а, јер се тиме разјашњава који физички аспекти су обухваћени овим фактором. Разјашњавање овог појма има велики значај при прављењу поједностављених модела. Недовољно разумевање физичких основа је у претходној пракси доводило до промашаја у концептима израде поједностављених модела, који су се, због једноставне реализације, често примењивали у пракси.

Резултати студије утицаја влаге на динамику старења папирне изолације су од изузетног значаја за процес процене стања енергетских трансформатора и стратегију њиховог одржавања и замене. Успостављена веза између параметара који се добијају на основу анализа узорака уља и индекса полимеризације представља значајано унапређење праксе дијагностике стања папирне изолације у односу на веома непрактичне традиционалне методе инвазивног узорковања.

Унапређење модела постојећих елемената детаљног термо-хидрауличног модела (падова притисака у глави радијатора и коефицијената преласка топлоте струјањем на радијалним површима проводника када се не врши усмеравање уља у радијалне канале) повећава укупну тачност детаљног термо-хидрауличног модела.

Метода за процену стања хладњака, односно степена његове запрљаности и процене промене у будућности, заснована на примени статичког детаљног термо-хидрауличног модела и поједностављеног термичког модела прелазних појава је практично примењива за намене планирања оптерећења и одржавања трансформатора (планирања чишћења хладњака).

Представљена истраживања су у огромној мери била мотивисана проблемима из праксе пројектовања, а приступ који је примењен је коришћење математичких модела, софтверских алата и техника програмирања које су по својој комплексности на врху метода које се тренутно примењују или их чак и превазилазе.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Комисија је на основу увида у дисертацију кандидата проценила да кандидат Урош Радоман показује способност за самостални научно-истраживачки рад. Кандидат је показао да је упознат са актуелним светским трендовима у својој области, да препознаје конкретне проблеме, да суштински анализира њихове узроке и последице, да у анализи користи најсавременије рачунарске алате, формира математичке моделе, успешно их имплементира у актуелном објектно-оријентисаном програмском језику и врши њихову верификацију.

Сама дисертација написана је квалитетно, у смислу да је кандидат показао да је способан да представи стање области, јасно искаже проблеме, и опише реализована унапређења и њихову верификацију. Анализе које је кандидат спроводио су темељне и научно засноване.

Кандидат је кроз свој дугогодишњи истраживачки рад остварио запажене научно-истраживачке резултате (аутор је 5 радова у часописима са SCI листе и бројних радова на међународним и домаћим конференцијама, а учествовао је и на више научних и комерцијалних студија и истраживања) и показао да је способан за самостални научни рад.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

У докторској дисертацији су остварени следећи научни доприноси:

- Дата је интерпретација *hot-spot* фактора, који се у пракси дефинише као кумулативна вредност, али није дат начин како ову вредност одредити у фази пројектовања. Извршена је декомпозиција *hot-spot* фактора, и показано да начин на који је он дефинисан у стандардима и класичној инжењерској пракси није адекватан.
- Дате су зависности старења изолације на бази спроведених мерења у лабораторијским условима и на стварном трансформатору од садржаја влаге. Успоставља је корелација између индекса полимеризације DP папира и концентрације фурана растворених у уљу, чиме се до стања изолације (чији је DP главни показатељ) може доћи путем неинвазивне методе за процену остарелости изолације. Кандидат је допринео стварању концепта експеримента и дефинисању конструкције трансформатора снаге 300 kVA, тако да се остваре циљани експериментални параметри. Поред тога, дао је допринос у анализи резултата експеримената. Сама мерења (хемијске анализе и одређивање индекса полимеризације) су вршили други чланови мултидисциплинарног тима.
- Осмишљени су и, у фабрици трансформатора Тамини у Италији, остварени захтевни и скупи експерименти са великим радијаторским батеријама које се стварно користе на

трансформатору. На бази резултата експеримената су развијене формуле за одређивање локалних падова притиска у глави радијатора, који није био уважен у постојећем детаљном термо-хидрауличком моделу, због чега су израчунати протоци у случају хлађења са принудним струјањем уља били већи од стварних, а израчунати температурни градијент дуж радијатора мањи од стварног.

- Дате су нове једначине за израчунавање коефицијента преласка топлоте струјањем у радијалним каналима намотаја без усмереног струјања уља, при условима који одговарају природном струјању уља.
- Извршена је упоредна анализа ефикасности хлађења намотаја без баријера за усмеравање уља и неколико његових модификација, када се у њега постави различит број баријера за усмеравање уља.
- Развијена је нова метода за динамичко моделовање процеса запрљања трансформаторских размењивача топлоте уље-вода типа *shell-and-tube*, који као расхладни флуид користе речну воду. Метода је заснована на мерењима која се стандардно врше у склопу система за надзор великих трансформатора са овим типом размењивача топлоте. Одређивање параметара модела и тестирање методе је вршено на бази мерења на трансформатору снаге 420 MVA у реалном погону на хидроелектрани Ђердап 1.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Комисија констатује да је кандидат остварио неколико доприноса у предметној области, у неколико независних тема.

Прва тема је старење папирне изолације у реалним мрежним условима карактерисаним променљивим оптерећењем, температуром амбијента и садржајем влаге. Ово истраживање, засновано на експериментима на два трансформатора снаге 300 kVA, са различитим садржајем влаге, представља велики подухват, који је био подржан од стране Електропривреде Србије. Улога кандидата у припреми и извођењу експеримената, као и анализи резултата, је јасна и значајна. Веома користан резултат истраживања је успостављање корелације између индекса полимеризације, чије је директно одређивање везано са низом практичних проблема, и садржаја фурана, који се може одредити анализама на узорцима уља узетим из трансформатора.

Друга тема се односи на интерпретацију *hot-spot* фактора трансформаторских намотаја. Комисија сматра да је веома значајан допринос разјашњењу шта све утиче на овај фактор и закључак да није могуће раздвојити утицај неравномерности губитака и неравномерности хлађења, а затим одредити кумулативни *hot-spot* фактора множењем фактора неравномерности губитака и неравномерности хлађења. Анализе спроведене на стварном трансформатору снаге 100 MVA, коришћењем софтвера базираног на детаљном термо-хидрауличком моделу, су убедљиве и аргументују предлог да се приступ из релевантног међународног IEC стандарду замени новопредложеним.

Детаљни термо-хидраулички модел је данас препознат као оптимални алат за симулацију термичког понашања енергетских уљних трансформатора, јер се заснива на основним физичким постулатима (одржању масе, енергије и момента). Тачност детаљног термо-хидрауличног модела је условљена тачношћу формула за локалне падове притисака и коефицијенте преласка топлоте струјањем, који су сложена функција геометрије и термичких и хидрауличких параметара флуида. Због тога је истраживање које је спровео кандидат за локалне падове притисака у глави радијатора (на бази експеримената) и за коефицијенте преласка топлоте на хоризонталним површима намотаја без усмеравања уља (на бази CFD/FEM симулација) значајна. Кандидат је показао способност за извођење захтевних експеримената (извођених у фабричкој испитној лабораторији) и примену најсавременијих метода и софтвера како би се анализирали детаљи конструкције и развили аналитички изрази који описују хидрауличке и термичке величине.

Комисија је препознала допринос који је кандидат остварио у правцу процене нивоа запрљања трансформаторског размењивача топлоте уље-вода типа *shell-and-tube*. Значајна развојна етапа је завршена и њеним наставком се може доћи до методе за планирање оптерећивања трансформатора и оптимизацију процеса одржавања (чишћења хладњака) трансформатора у хидро електрани.

Кандидат је за сва истраживања транспарентно приказао проблеме, методологију и резултате.

4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат Урош Радоман је као коаутор објавио следеће научне радове у вези са темом дисертације:

Врхунски међународни часопис (категорија М21):

1. Z. Radaković, U. Radoman, P. Kostić „Decomposition of the Hot-Spot Factor“, IEEE Transactions on Power Delivery 2015, 30(1): pp. 403-411, (2015 *IF* = 2.032) <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2014.2352039>
2. D. Rogora, S. Nazzari, U. Radoman, Z. Radaković „Experimental research on the characteristics of radiator batteries of oil immersed power transformers“, IEEE Transactions on Power Delivery 2020, 35(2): pp. 725-734, (2020 *IF* = 4.131) <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2925451>

Истакнути међународни часопис (категорија М22):

1. V. Vasović, J. Lukić, D. Mihajlović, B. Pejović, Z. Radaković, U. Radoman, A. Orlović, „Aging of transformer insulation — experimental transformers and laboratory models with different moisture contents: Part I — DP and furans aging profiles“, IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation 2019, 26(6): pp. 1840-1846, (2019 *IF* = 2.554) <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008183>
2. V. Vasović, J. Lukić, D. Mihajlović, B. Pejović, M. Milovanović, U. Radoman, Z. Radaković, „Aging of transformer insulation of experimental transformers and laboratory models with different moisture contents: Part II — moisture distribution and aging kinetics“, IEEE Transactions On Dielectrics And Electrical Insulation 2019, 26(6): pp. 1847-1852 (2019 *IF* = 2.554) <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008184>

Зборници међународних научних скупова (категорија М33):

1. Z. Radakovic, U. Radoman, D. Vukotic, S. Tenbohlen, “Dynamic top oil thermal model of oil immersed power transformers with tap changer”, VDE High Voltage Technology 2016; ETG-Symposium, VDE High Voltage Te, issn: 978-3-8007-4310-0, 14-16. Nov, 2016.
2. U. Radoman, A. Jovanović, Z. Radaković, ”Prikaz softvera za termičko projektovanje energetskih uljnih transformatora”, XVII međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2018, ENS-2-6, Jahorina, 21-23. Mar, 2018
3. Z. Radaković, U. Radoman, G. Klasnić, R. Matic, “Cold start-up and loading of oil immersed power transformers at extreme ambient temperatures”, 47. CIGRE session, Paris, A2-116, Paris, 26.-31. Aug, 2018
4. J. Lukić, V. Vasović, D. Mihajlović, B. Pejović, S. Milosavljević, Z. Radaković, U. Radoman, „Cellulose Ageing and Water Content Estimations - Correlations of Experimental Transformers Ageing to Real Transformers in Service and Post-Mortem Analyses, International Colloquium on Power Transformers & Reactors, Overhead Lines; and Materials and Emerging Test Techniques“, Under the aegis of CIGRE SC A2 on Transformers; B2 on Overhead Lines and D1 on Materials, pp. D1-98 - D1-104, New Delhi, India, Nov, 2019
5. A. Popović, U. Radoman, Z. Radaković, „Pojava inverznog smera strujanja ulja u namotajima sa barijerama i njegov uticaj na faktor najtoplije tačke u energetskim uljnim transformatorima“, VII Savjetovanje CG KO CIGRE, R A2-03, Bečići, Crna Gora, Sep, 2021 (рад проглашен као најзапаженији на комитету А2)

Зборници домаћих научних скупова (категорија М63):

1. Н. Илић, Ј. Лукић, З. Радаковић, У. Радоман, Д. Радић, Д. Милосављевић „Концепт експеримента за убрзано старење изолације и конструкција наменског трансформатора“, 32. саветовање ЦИГРЕ Србија, Златибор, 17–21. мај 2015, Р А2 08 (рад проглашен као најзапаженији на комитету А2).
2. Б. Пејовић, Н. Илић, З. Радаковић, У. Радоман, Д. Радић, Ж. Живковић „Резултати фабричких испитивања и корекција конструкције наменског трансформатора за испитивање убрзаног старења чврсте изолације“, 32. саветовање ЦИГРЕ Србија, Златибор, 17–21. мај 2015, Р А2 09
3. З. Радаковић, У. Радоман, Н. Ђорђевић, “Могућности уштеде енергије контролом расхладног система енергетских улјних трансформатора“, X Јубиларно саветовање о

електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, CIREД, Врњачка Бања, 26-30. сеп, 2016, Р-4-11

4. У. Радоман, З. Радаковић, А. Јовановић, П. Николић, „Метода за процену оптеретљивости трансформатора услед запрљања shell-and-tube компактних хладњака“, 33 саветовање ЦИГРЕ Србија, Златибор, 5-8. јун, 2017, Р А2 10
5. З. Радаковић, М. Новковић, У. Радоман, С. Милосављевић, В. Остраћанин, Р. Тодоровић, „Процена старења трансформатора на основу дијаграма оптерећења, садржаја влаге у изолационом систему и температуре амбијента“, 12. Саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Врњачка бања, авг, 2021, Р-1.17 (рад проглашен за најбољи на STK1)

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

Докторска дисертација кандидата, под називом „Унапређење детаљног термо-хидрауличког модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена“, коју је Комисија прегледала, показује научну зрелост кандидата Уроша Радомана.

Садржај дисертације у потпуности одговара садржају предложеном у образложењу теме, предатом при пријави теме, и садржи све елементе прописане Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.

Област дисертације је термички аспект рада енергетских уљних трансформатора. Дисертација се у уводним поглављима бави општим аспектима рада енергетских трансформатора, дат је преглед уобичајених конструкцијских решења, принцип одвођења топлоте, и дефинисани су основни појмови. У наставку, дисертација се бави најзначајнијом последицом високих температура у енергетским уљним трансформаторима – старењем папирне изолације. Након уводних разматрања како хемијских и физичких механизма, тако и техно-економских последица деградације папирне изолације, представљена је студија у којој је разматран утицај температуре и садржаја влаге на динамику старења. Практичан резултат студије је општа, неинвазивна метода процене степена полимеризације целулозних влакана папирне изолације, тј. његове релативне старости, што је обично критичан фактор стања целог трансформатора. У наредном поглављу, на практичним примерима извршена је теоријска анализа традиционалног концепта одређивања *hot-spot* фактора. Затим, експерименталном методом, на моделу расхладног система у природној величини, одређени су коефицијенти локалних падова притисака у главама радијатора три комерцијална типа трансформаторских радијатора. Друго унапређење детаљног термо-хидрауличког модела представљено у дисертацији су нове једначине за коефицијент преласка топлоте струјањем у радијалним уљним каналима трансформаторских намотаја без баријера за усмеравање уља. Једначине за коефицијент преласка топлоте струјањем одређене су на основу рачунарских симулација коришћењем рачунарског програма заснованог на FEM/CFD, а касније су потврђене на резултатима експеримената објављеног у литератури. Ове једначине су употребљене и у упоредној анализи ефикасности хлађења намотаја различите конструкције (намотаја са и без усмереног струјања уља). На крају, представљена је нова метода за процену запрљања трансформаторских хладњака уље-вода типа *shell-and-tube*, као и динамички модел промене запрљања у времену. Метода је заснована на стандардним мерењима и намењена је процени максимално дозвољеног трајног оптерећења или максимално дозвољеног трајања задатог преоптерећења. Такође, динамички модел промене вредности фактора запрљања може бити употребљен за процену промене фактора запрљања у будућности, и у том смислу бити користан алат за прогнозу планирања оптерећења трансформатора и одржавања (чишћења) трансформаторских хладњака.

Резултати ове дисертације су објављени у 4 рада у међународним часописима са SCI листе (два M21 и два M22, за која, према подацима са Scopus-a, постоји 55 хетеро-цитата), као и више радова на конференцијама.

Након прегледа докторске дисертације и радова чији је кандидат један од коаутора, Комисија је закључила да докторска дисертација садржи оригиналан и савремен научни допринос у области термичког моделовања енергетских уљних трансформатора.

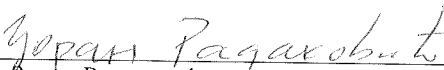
Кандидат Урош Радоман показао је способност за самостални научни рад.


На основу наведеног, Комисија констатује да је кандидат Урош Радоман, дипломирани инжењер електротехнике и рачунарства – мастер, испунио све услове предвиђене Законом о високом образовању, Статутом и Правилником о докторским студијама Електротехничког факултета Универзитета у Београду.


Имајући у виду наведено, Комисија предлаже Наставно-научном већу Електротехничког факултета Универзитета у Београду да се докторска дисертација под називом **„Унапређење детаљног термо-хидрауличког модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена”** кандидата **Уроша Радомана** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

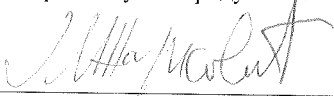
У Београду, 24.04.2023. године

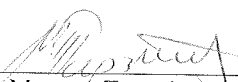
ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ


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


др Зоран Лазаревић, редовни професор у пензији
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Мирко Коматина, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет


др Милета Жарковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет


др Младен Терзић, ванредни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет