

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Подобност теме и кандидата Уроша Радомана за израду докторске дисертације

Одлуком бр. 5017/14-1 од 14.7.2022. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата Уроша Радомана за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под називом "Унапређење детаљног термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена".

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

ИЗВЕШТАЈ

1. Подаци о кандидату

1.1. Биографски подаци

Урош, Никица, Радоман рођен је 17. 6. 1987. у Београду, СР Србија, СФРЈ. Основну школу "Ђуро Стругар" на Новом Београду је завршио школске 2001/2002. године као носилац Вукове дипломе, а Земунску Гимназију 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" је одбранио са оценом 10 код ментора проф. др Слободана Вукосавића. Мастер студије уписао је школске 2012/2013. године, модул Енергетски претварачи и погони, а диплому мастер инжењера електротехнике и рачунарства стекао је септембра 2014. са просечном оценом 9,83. Мастер рад "Моделовање прелазних термичких процеса код енергетских уљних трансформатора са регулатором напона" одбранио је са оценом 10 код ментора проф. др Зорана Радаковића. Докторске студије уписао је школске 2014/2015. године, модул Енергетски претварачи и погони. Положио је све испите на докторским студијама, са просечном оценом 10. До сада је објавио 5 радова у међународним часописима са SCI листе, 8 радова на међународним конференцијама и 6 радова на домаћим конференцијама. Од 2013. године запослен је као истраживач на Електротехничком факултету Универзитета у Београду, на пројекту Министарства просвете, науке и технолошког развоја Републике Србије "Повећање енергетске ефикасности, поузданости и расположивости електрана ЕПС-а утврђивањем погонских дијаграма генератора и применом нових метода испитивања и даљинског надзора". Његов истраживачки рад је усмерен на моделовање топлотних процеса у енергетици, пре свега на развој детаљног термо-хидрауличног модела енергетских

трансформатора и софтвера базираног на овом моделу, затим на анализу и прорачуне расподеле електромагнетског поља и губитака у енергетским трансформаторима, као и FEM/CFD анализу топлотних и електромагнетних 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.

1.2. Стечено научноистраживачко искуство

Урош Радоман, уписан је школске 2014/2015. године на докторске студије на модулу Енергетски претварачи и погони. Током докторских студија положио је све испите предвиђене наставним планом и програмом и испунио све обавезе и то:

Р. бр.	Шифра	Назив предмета	Оцена	ЕПСБ	Датум
1	13Д011ППМ	Прелазне појаве у електричним машинама	10 (десет)	9	07.07.2015.
2	13Д011ОПС	Одабрана поглавља из специјалних електричних инсталација	10 (десет)	9	07.07.2015.
3	13Д011ЕСМ	Електрични сервомотори	10 (десет)	9	11.09.2015.
4	13Д011ММЕ	Математичко моделирање у електротермији	10 (десет)	9	08.09.2015.
5	13Д011МКЕ	Метода коначних елемената у електромагнетици	10 (десет)	9	01.02.2015.
6	13Д011ИЕП	Интеграција електромоторних погона у сложене системе покретања и управљања	10 (десет)	9	20.09.2019.
7	13Д011ЕПП	Електромагнетни прелазни процеси у електроенергетским системима	10 (десет)	9	02.07.2020.
8	13Д011ЕЈ	Енглески језик	10 (десет)	6	19.09.2018.
9	13Д011ПЕБ	Позитивни ефекти употребе бентонита у системима уземљења	10 (десет)	9	20.09.2018.
10	13Д011ММФ	Математичко моделовање физичко-техничких процеса	10 (десет)	9	05.02.2020.
Р. бр.		Назив обавезе		ЕПСБ	
1		Научно-стручни рад		3	
2		Судијски истраживачки рад I		15	
3		Судијски истраживачки рад II		15	
		Укупно остварено:		120	

Кандидат је аутор 14 радова на конференцијама и 5 радова у часописима. Списак радова у наставку је дат у складу са важећом категоризацијом.

Рад у међународном часопису категорије M21a

1. S. Petrović, F. Bühler, U. Radoman, R. McKenna "Power transformers as excess heat sources –a case study for Denmark", Energy 2022, 239(E): 122416, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2021.122416>

Радови у међународним часописима категорије M21

1. Z. Radaković, U. Radoman, P. Kostić "Decomposition of the Hot-Spot Factor", IEEE Transactions on Power Delivery 2015, 30(1), pp. 403 - 411,
<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,
<https://doi.org/10.1109/TPWRD.2019.2925451>

Радови у међународним часописима категорије M22

1. V. Vasović, J. Lukić, D. Mihajlović, B. Pejović, 3. Радаковић, 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
<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
<https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008184>

Радови на међународним скуповима штампани у целини (категирија M33)

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, pp. 516 – 521, M33
2. U. Radoman, A. Jovanović, Z. Radaković, "Prikaz softvera za termičko projektovanje energetskih uljnih transformatora", XVII međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2018, Jahorina, 21. - 23. Mar, 2018, ENS-2-6, M33
3. Z. Radaković, U. Radoman, G. Klasnić, R. Matić, "Cold start-up and loading of oil immersed power transformers at extreme ambient temperatures", 47. CIGRE session, Paris, Paris, 26. - 31. Aug, 2018, A2-116, M33
4. N. Đorđević, U. Radoman "Razvoj fleksibilnog hardvera za trofazni inverter snage 11 kw priključen na mrežu", XVIII međunarodni simpozijum INFOTEH-JAHORINA 2019, Jahorina, Mar, 2019, ELS-10, M33
5. S. Petrović, F. Bühler, U. Radoman "Power transformers as excess heat sources", Proceedings of ECOS 2019 - The 32nd International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, Wroclaw, Poland, June 23 - 28, 2019, pp. 3435 – 3447, M33
6. S. Petrović, F. Bühler, U. Radoman "Availability of excess heat from power transformers in future scenarios", Proceedings of the 14th Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems (SDEWES 2019, Dubrovnik, Croatia, 2019), paper 0738, M33
7. 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, New Delhi, India, Nov, 2019, pp. D1-98 - D1-104, M33

8. 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 Savetovanje CG KO CIGRE, Bečići, Crna Gora, Sep, 2021, R A2-03, M33

Рад 8. је један од два рада који су добили признање као најзапаженији представљени радови на VII саветовању CG KO CIGRE.

Радови на домаћим скуповима штампани у целини (категорија M63)

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 CIGRE Србија, Златибор, 17–21. мај 2015, Р А2 08, М63
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 CIGRE, Златибор, 17–21. мај 2015, Р А2 09, М63
3. З. Радаковић, У. Радоман, Ј. Грујић, М. Жерајић "Поређење ирадијансе и енергије произведене кровним фотонапонским системом добијених прорачуном и мерењем", 32. саветовање CIGRE Србија, Златибор, 17–21. мај 2015, Р Ц6 05, М63
4. З. Радаковић, У. Радоман, Н. Ђорђевић, "Могућности уштеде енергије контролом расхладног система енергетских уљних трансформатора", X Јубиларно саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, CIRED, Врњачка Бања, 26-30. сеп, 2016, Р-4-11, М63
5. У. Радоман, З. Радаковић, А. Јовановић, П. Николић, "Метода за процену оптеретљивости трансформатора услед запрљања shell-and-tube компактних хладњака", 33 саветовање CIGRE Србија, Златибор, 5-8. јун, 2017, Р А2 10, М63
6. 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. CIGRE Саветовање о електродистрибутивним мрежама Србије са регионалним учешћем, Врњачка бања, авг, 2021, Р-1.17, М63

Радови 1. и 6. су проглашени за најзапаженије на студијским комитетима на којима су представљени.

Техничко решење (категорија M83)

1. Зоран Радаковић, Никола Ђорђевић, Урош Радоман, Душан Јачић, Никола Илић: Методологија и софтверска подршка за утврђивање стања изолационог система блок трансформатора, Техничко решење је резултат на пројекту технолошког развоја TP 33024, усвојено од стране Комисије за студије трећег степена Електротехничког факултета у Београду, 30. 1. 2013, M83 (нови технолошки поступак)

Урош Радоман је учествовао на више пројеката, како оних финансираних у потпуности или делимично од стране Министарства просвете, науке и технолошког развоја, тако и директно од индустријских партнера. Навешћемо три најзначајнија пројекта, који су у директној вези са темом докторске дисертације:

1. Истраживачка трансформаторска термичка мерења на експерименталном суду у фабрици Тамини, Лењано, Италија, 2017
2. Оптимизација конструкције енергетских уљних трансформатора у циљу повећања ефикасности хлађења, уштеде материјала и смањења производних трошкова, Иновациони фонд – Ваучери, COMEL TRANSFORMATORI d.o.o., април 2021.

3. Софтвер за динамичко термичко моделовање трансформатора, HYDRO- QUEBEC, Канада, од јула 2021.

Дана 14.07.2022. године кандидат Урош Радоман је на Електротехничком факултету Универзитета у Београду успешно одбранио тему докторске дисертације на усменој одбрани пред Комисијом:

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

1.3. Оцена подобности кандидата за рад на предложеној теми

Комисија је анализирала претходно наведене досадашње резултате рада кандидата. На основу извршене анализе, као и на основу усмене одбране теме докторске дисертације, Комисија је формирала позитиван став у вези са способностима кандидата за рад на предложеној теми докторске дисертације. Главни разлози за такав став су зрелост кандидата у области којом се бави докторска дисертација, оспособљеност кандидата за писање научних радова и до сада објављени радови и остварена стручна достигнућа кандидата. Кандидат има остварења у међународном окружењу и публикације у квалитетним међународним часописима.

Због претходно наведеног, Комисија сматра да је кандидат подобан за рад на предложеној теми докторске дисертације

2. Предмет и циљ истраживања

Предмет докторске дисертације спада у класичне инжењерске проблеме, који постоје од када су направљени први енергетски трансформатори потопљени у изолациону течност (1890. година), али због своје комплексности и важности и даље представљају тему истраживања и развоја у индустрији. Развој рачунских ресурса у последњих неколико деценија омогућио је примену комплексних математичких модела, чија је примена у прошлости била незамислива. Интересантно је поменути референцу [1], објављену 2017. године, у којој је извршен преглед литературе везане за динамичке термичке процесе код енергетских уљних трансформатора (статистика референци током времена: пре 1947 – 14, између 1947 и 1997 – 15, и после 1997 – 66).

Номинална снага енергетских трансформатора практично је ограничена порастом температуре која је последица губитака насталих услед протока електричне струје кроз проводнике и индукованог електромагнетног поља у језгру и металним конструкционим деловима [2]. Једна од основних карактеристика изолационог флуида (уља, које осим изолације служи и као расхладни флуид) и чврсте изолације унутар трансформатора јесте њихова номинална температура [3]. При номиналној температури, старење изолације је номинално (јединично). Међутим, при температурама вишим од номиналне, релативно старење трансформатора се убрзава експоненцијално [4-7] (на примеру стандардне папирне изолације, ИЕС стандард [8] сматра да се за пораст температуре од 6 К релативно старење удвостручи). Осим утицаја температуре, стандард [8] (у свом анексу) уважава и зависност старења од садржаја воде и раствореног кисеоника у уљу (такође, описано и у [4-6]).

Приликом пројектовања и производње енергетских трансформатора, мора се обезбедити ефикасно хлађење уређаја, које ће обезбедити да највише температуре течне и чврсте изолације не пређу дозвољене вредности [8]. Одређивање локације и вредности температуре на позицијама на којима се јављају највише температуре представља комплексан задатак. Постојеће прорачунске методе су у великој мери засноване на емпиријским релацијама, па имају ограничену област примене, али и тачност прорачуна. Управо ова чињеница отвара простор за предложену докторску дисертацију и развој нових прорачунских метода које би се развиле у оквиру дисертације.

Због наведене комплексности појава (како електромагнетних, које дају расподелу магнетног поља и губитака у електропроводним деловима, тако и термо-хидрауличких, које дају расподелу протока уља и температура уља, проводника, језгра и конструкционих делова), постоји проблем одређивања критичних (највећих) температура у трансформатору. Уместо провере критичних температура, стандардима [9] за фабричка испитивања трансформатора предвиђа се провера карактеристичних температура у трајном раду, при снази загревања која одговара губицима у раду трансформатора на мрежи при номиналној декларисаној снази. Ове карактеристичне температуре су температура уља у цепу на поклопцу трансформатора и средња температура намотаја. Најкритичније вредности температура уља и намотаја (тачније, чврсте изолације) нису вредност температуре уља у цепу, ни средња вредност температуре намотаја, али се ове вредности температура једноставно мере. По правилу, локације најкритичнијих вредности температуре уља и чврсте изолације (максималне локалне температуре) нису лако доступне, а као што је речено, постојеће класичне прорачунске методе не могу да их предвиде. Поред тога, ова места се налазе на високим потенцијалима, због чега се температуре морају мерити помоћу фибер-оптичких (ФО) сензора [10]. Уградња сензора са собом носи трошкове, како самих сензора и мерног система, тако и успоравање процеса израде намотаја и опреме за излазак фибер-оптичких влакана ван суда трансформаторског суда испуњеног уљем. На данашњем нивоу трансформаторске технике, ФО сензори су постали стандард за велике трансформаторе. Такође, чест је случај да је за корисника трансформатора (поготово мањих јединица) задовољавајуће да трансформатор прође стандардизовани оглед грејања, а да се уместо провере највише температуре намотаја (тзв. *hot-spot*) ФО сензорима, ова вредност одреди на основу *hot-spot* фактора који му гарантује произвођач (који га је добио неком интерном прорачунском методом), или да се, као следећи виши ниво занемарења, користе типичне вредности *hot-spot* фактора дате у стандардима.

Због већ наведених ограничења тачности класичних, емпиријски заснованих, прорачунских метода, у пракси је уобичајено да се примењују релативно велике сигурносне маргине при прорачуну температура. Крајњи ефекат је да се енергетски трансформатори предимензионишу, што значи да су температуре ниже од дозвољених, утрошак материјала већи, а последично, и већи производни трошкови и нижи профит произвођача. У литератури се могу наћи чланци који дају статистичке податке о предимензионисању трансформатора и губитку профита због оваквог приступа при пројектовању [11]. Сигурносне маргине је могуће смањити побољшањем прецизности прорачуна, заснованих на што детаљнијем моделовању конструкционих елемената и утицаја карактеристика материјала на физичке параметре хидрауличких и топлотних процеса. Класичан приступ, заснован на емпиријским формулама је практично прихватљив за мање трансформаторе, који се серијски производе, и код којих "покушаји промене" (па и са негативним исходом да температуре пређу дозвољене) могу бити економски прихватљиви. То не важи за велике енергетске трансформаторе, чије цене прелазе милионске износе у еврима.

Постојећи (и у пракси још увек широко распрострањен) приступ јесте употреба емпиријских термичких модела. Они се заснивају на примени бројних корекционих фактора, дефинисаних током низа година искуства и великог броја произведених, и у испитним станицама испитаних, трансформатора. Природно, до тачнијих прорачуна су могли доћи велики произвођачи. Савремени приступ прорачунским методама јесте примена модела заснованих

детаљним термо-хидрауличким мрежама (ДТХМ) [12]. Поред тога, треба рећи и да је софтвер заснован на методи коначних елемената (FEM) и рачунарске динамике флуида (CFD) знатно напредовао претходних година, баш као и процесорска моћ рачунара, и методе рачунарске оптимизације за употребу ових метода у системима са више процесорских језгара. Упркос томе, и поред успешних (академских) покушаја [13], примена FEM/CFD као алата за комплетан термички прорачун трансформатора далеко је од реалне примене у индустрији трансформатора. Разлог нису само потреба за великим рачунарским ресурсима и време трајања прорачуна, већ и нумеричка нестабилност модела (због које, не ретко, прорачун не конвергира).

Као што је већ напоменуто, примена софтвера базираног на ДТХМ препозната је као оптималан приступ за пројектовање енергетских уљних трансформатора. Произвођачи прате тај тренд, односно оне компаније које су на високом општем нивоу технологије, како производне, тако и у инжењерингу (пројектовању и конструкцији), крећу се ка примени ДТХМ: они највећи развијају свој софтвер, док мањи купују специјализован софтвер, или плаћају услугу прорачуна за иновативне конструкције (које нису покривене постојећим емпиријским правилима те компаније), или важне трансформаторе (велике јединице или важне купце). На тржишту се уочава и појава да купци траже резултате таквих прорачуна ради потврде локације и температуре *hot-spot*-а. Имајући у виду да је примена ДТХМ (и софтвера базираног на њему) релативно нова, постоји низ детаља које је потребно истражити и унапредити. Примера ради, иако су неке уобичајене геометрије врло добро покривене литературом [14, 15], у њој се у врло ограниченом обиму могу наћи изрази за локалне падове притиска за специфичне геометрије, брзине и карактеристике унутрашњег изолационог флуида (уље или други типови изолационе течности), који одговарају реалним ситуацијама у трансформатору. Такве детаље је потребно истражити, а резултате уградити у целину ДТХМ. Анализа појединачних детаља конструкције може бити вршена применом FEM/CFD софтвера или заснована на експерименталним истраживањима [16-22].

Може се очекивати да ће ДТХМ у наредних неколико година наћи примену, не само у пројектовању трансформатора (прорачун стационарних температура), већ и у склопу *мониторинг* система, за процену могућности преоптерећења трансформатора, као једне од корисних функционалности у оквиру *smart-grid* система. Овакве примене базирале би се на примени динамичког ДТХМ, за разлику од статичког ДТХМ, који је доминантно од интереса за пројектовање трансформатора. Истраживања у овој докторској дисертацији била би фокусирана на стационарни ДТХМ, и у том смислу постављају се следећи циљеви.

Циљ 1 јесте да се јасно диференцирају компоненте *hot-spot* фактора, који је у важећем међународном стандарду дефинисан кумулативно. Стандард само сугерише да на неравномерност температуре (последично и *hot-spot* фактор) утиче неравномерност расподеле губитака у проводницима и неравномерност хлађења. Применом ДТХМ извршиће се декомпозиција овог фактора и тиме расветлити овај важан феномен [23].

Циљ 2 јесте побољшање формула за коефицијенте преласка топлоте струјањем у намотајима са аксијалним и радијалним каналима за хлађење, без баријера за усмеравање уља. У литератури практично не постоји адекватна формула за ову конструкцију, која је од практичног значаја, превасходно, код трансформатора са природним струјањем уља [24]. Због тога је циљ да се формуле развију за случај природног струјања уља, односно са облашћу важења при нижим брзинама струјања уља у аксијалним каналима за хлађење.

Циљ 3 јесте утврђивање ефеката увођења баријера за усмеравање уља кроз радијалне канале за хлађење, што ће бити урађено на бази поређења идентичних геометрија проводника и канала, са и без баријера за усмеравање уља. Имајући у виду познате тешкоће које се јављају при већим брзинама струјања уља, није извесно да је могуће поставити формуле за коефицијенте преласка топлоте у радијалним каналима када не постоје баријере за усмеравање уља (циљ 2) при диригованом струјању уља (OD хлађење). Због тога ће поређење бити ограничено на природно струјање уља (ON хлађење).

Циљ 4 јесте да се истраже локални падови притиска у глави радијатора (на преласку између долазне и одлазне цеви ка ребрима радијатора). Показало се да при принудном струјању уља и примени радијатора долази до грешке у одређивању протока уља, због чега је наведени пад притиска потребно истражити. Ова истраживања би се обавила кроз експерименте на радијаторима различитих произвођача [25].

Циљ 5 истраживања јесте развој динамичког модела запрљања размењивача топлоте уље-вода (ODWF тип хлађења) типа *shell-and-tube*. Применио би се квази-стационарни ДТХМ. Овакав модел запрљања хладњака је потребан као део *plug-in* програма који на основу стандардних мерења (оптерећење, температура амбијента, проток воде, температура воде на уласку и изласку из хладњака, проток уља и температура уља на уласку и изласку из хладњака) врши *online* процену максималног оптерећења трансформатора и/или времена дозвољеног преоптерећења.

Истраживања описана кроз циљ 5 може се применити не само у експлоатацији трансформатора, већ и за планирање одржавања друге опреме која садржи размењиваче топлоте. Аналитички модел запрљања односио би се на запрљање размењивача топлоте [26-31], али пре свега би описао доминантну биолошку компоненту код хладњака са воденим хлађењем који користе речну воду.

- [1] Djamali M, Tenbohlen S. Hundred years of experience in the dynamic thermal modelling of power transformers. IET Generation, Transmission and Distribution 2017; 11(11), pp. 2731-2739.
- [2] Kulkarni SV, Khaparde SA. Transformer Engineering: Design, Technology, and Diagnostics. 2nd ed. Boca raton: CRC Press; 2012.
- [3] IEC Electrical insulation – "Thermal evaluation and designation". IEC Standard 60085, 2007.
- [4] Vasović V, Lukić J, Mihajlović D, Pejović B, Radaković Z, Radoman U, Orlović A. 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.
- [5] Vasović V, Lukić J, Mihajlović D, Pejović B, Milovanović M, Radoman U, Radaković Z. 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): 1847-1852.
- [6] Lundgaard LE, Hansen W, Linhjell D, Painter TJ. Aging of oil-impregnated paper in power transformers. Power Delivery, IEEE Transactions on 2004; 19(1), pp. 230-239.
- [7] Lelekakis N, Wenyu Guo, Martin D, Wijaya J, Susa D. A field study of aging in paper-oil insulation systems. Electrical Insulation Magazine, IEEE 2012; 28(1), pp. 12-19.
- [8] IEC Power Transformers – Part 7: "Loading guide for oil-immersed power transformers". IEC Standard 60076-7, 2018.
- [9] IEC Power Transformers – Part 2: "Temperature Rise for Liquid-Immersed Transformers". IEC Standard 60076-2, 2011.
- [10] CIGRE (International council on large electric systems), WG A2.38: Transformer thermal modeling, ISBN: 978-2-85873-362-0.
- [11] Radaković Z, Šorgić M. Wirtschaftliche Betrachtung der thermischen Auslegung von ölgekühlten Leistungstransformatoren. Elektrizitätswirtschaft 2008; 107(15), pp. 32-38.
- [12] Radakovic Z, Sorgic M. Basics of Detailed Thermal-Hydraulic Model for Thermal Design of Oil Power Transformers. IEEE Trans. on Power Delivery 2010; 25(2), pp. 790-802.
- [12] Tsili MA, Amoiralis EI, Kladas AG, Souflaris AT. Power transformer thermal analysis by using an advanced coupled 3D heat transfer and fluid flow FEM model. Int. J. The. Sci. 2012; 53, pp. 188-201.
- [14] Incropera FP, DeWitt DP, Bergman TL, Lavine AS. Fundamentals of Heat and Mass Transfer. 6th ed. NJ, Hoboken: Wiley; 2007.
- [15] Idelchik IE. Handbook of Hydraulic Resistances, 3rd ed. FL, Boca Raton: CRC, 1994.
- [16] Coddé J, Van der Veken W, Baelmans M. Assessment of a hydraulic network model for zig-zag cooled power transformer windings. Applied Thermal Engineering 2015; 80, pp. 220-228.
- [17] Torriano F, Picher P, Chaaban M. Numerical investigation of 3D flow and thermal effects in a disc-type transformer winding. Applied Thermal Engineering 2012; 40, pp. 121-131.
- [18] Zhang J, Li X. Oil cooling for disk-type transformer windings—Part I: Theory and model development. IEEE Trans. On Power Delivery 2016; 21(3), pp. 1318-1325.
- [19] Zhang J, Li X. Oil cooling for disk-type transformer windings—Part II: Parametric studies of design parameters. IEEE Trans. On Power Delivery 2006; 21(3), pp. 1326- 1332.
- [20] Weinlader A, Wu W, Tembohlen S, Wang Z. Prediction of the oil flow distribution in oil-immersed transformer windings by network modeling and computational fluid dynamics. IET Elect. Power Appl. 2012; 6(2), pp. 83-90.

- [21] Paramane SB, Joshe K, Van der Veken W, Sharma A. CFD study on thermal performance of radiators in a power transformer: Effect of blowing direction and offset of fans. IEEE Trans. On Power Delivery 2014; 29(6): 2596-2604.
- [22] Lee JY, Lee SW, Woo JH, Hwang IS. CFD analyses and experiments of a winding with zig-zag cooling duct for a power transformer. CIGRE Biannual meeting 2010, Paris, France, 2010.
- [23] Radaković Z, Radoman U, Kostić P. Decomposition of the Hot-Spot Factor. IEEE Transactions on Power Delivery 2015; 30(1): 403-411.
- [24] Karsai K, Kerényi D, Kiss L. Large Power Transformers. Amsterdam, Oxford, New York, Tokyo: Elsevier; 1987.
- [25] Rogora D, Nazzari S, Radoman U, Radaković Z. Experimental research on the characteristics of radiator batteries of oil immersed power transformers. IEEE Transactions On Power Delivery 2020; 35(2): 725-734.
- [26] Radaković Z, Popović A. Variation of steady-state thermal characteristics of transformers with OFWF cooling in service. Electric Power Components & Systems 2003; 31(8): 817-829.
- [27] Epstein N. Thinking about Heat Transfer Fouling: A 5×5 Matrix. Heat Transfer Engineering 1983; 4(1): 43-56.
- [28] Melo LF, Bott TR. Biofouling in Water Systems. Experimental Thermal and Fluid Science 1997; 14(4): 375-381.
- [29] Müller-Steinhagen H. Chapter C4: Fouling of heat exchanger surfaces. In: Stephan P, Kabelac S, Kind M, Martin H, Mewes D, Schaber K, editors. VDI Heat Atlas. 79-104. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag; 2010.
- [30] Bohnet M. Fouling of heat transfer surfaces. Chemical Engineering & Technology 1987; 10: 113-125.
- [31] Rabas TJ, Panchal CB, Sasscer DS, Schaefer R. Comparison of River-Water Fouling Rates for Spirally Indented and Plain Tubes. Heat Transfer Engineering 1993; 14(4): 58-73.

3. Полазне хипотезе

Истраживачки рад биће базиран на следећим полазним хипотезама:

Постојећи приступи у пракси пројектовања, засновани на једноставним изразима и емпиријски одређеним коефицијентима садрже озбиљна ограничења у области примене и у погледу тачности прорачуна, што доводи до значајног увећања производних трошкова. Програми засновани на ДТХМ постају доминантни у примени, односно постају приступ који ће преовладати у будућности. Основна предност ДТХМ јесте праћење физичких законитости генерисања губитака, хидрауличких и топлотних појава, а њихова практична изводљивост постала је реална са тренутним нивоом развоја процесорских ресурса, чак и за *online* апликације.

Постоји низ детаља који се појављују као елементи у ДТХМ које треба проучити и прецизније математички описати.

Могуће је извршити декомпозицију *hot-spot* фактора који се традиционално користи у стандардима и инжењерској пракси, и на тај начин идентификовати факторе на које се може деловати, како би се смањиле температуре.

Могуће је извести тачније једначине – за хлађење при природном струјању уља, у радијалним каналима за конструкцију без баријера за усмеравање уља – базирани на резултатима FEM/CFD симулација.

Могуће је успоставити корелације за локалне падове притиска у глави радијатора различитих произвођача при хлађењу принудним струјањем уља, базираним на експериментима.

Могуће је успоставити математички модел који описује процес укупног запрљања хладњака са воденим хлађењем који користе речну воду, у којима доминира биолошка компонента, користећи експлоатационе параметре рада трансформатора.

4. Научне методе истраживања

У раду ће се користити различите научне методе:

Анализа постојећих решења везаних за аспекте загревања енергетских уљних трансформатора при њиховом пројектовању и експлоатацији, и сагледавање простора за научне и стручне доприносе.

Синтеза алгоритма ДТХМ и његових компоненти, за чију реализацију ће се користити методе из пасуса који следе.

Рачунарске симулације различитим софтвером базираним на FEM/CFD (COMSOL Multiphysics, FEMM).

Експерименталне методе (мерења перформанси спољашњег расхладног система спроведена су у сарадњи са фабриком TAMINI, Италија).

Анализа мерења са SCADA система којим се прати рад великог трансформатора (у сарадњи са Хидроелектраном „Бердап 1”, ЕП Србије).

Коришћење постојећих *solver*-а (из *Microsoft Excel*-а) за одређивање параметара аналитичких зависности, успостављених на бази претходно описаних метода истраживања. Програмирање у C# програмском језику у циљу обраде података и тестирања развијених алгоритама на основу њиховог поређења са резултатима мерења на енергетским уљним трансформаторима великих снага (доступан је опсег мерења на трансформаторима широког опсега снаге, све до 770 MVA).

5. Очекивани научни допринос

- Математичка формула за прорачун коефицијента преласка топлоте природног струјања уља са дискова трансформаторских намотаја на уље у радијалним каналима у намотаје без баријера за усмеравање уља.
- Дефинисање поступка за одређивање локалних падова притиска у глави радијатора, њихова реализација, укључујући експерименте на стварним радијаторима висине 3,2 m у фабрици Тамини (Италија), и верификацију помоћу софтвера реализованог у C# програмском језику, којим је симулирано експериментално постројење.
- Квантификацију ефеката (промена пада притиска и температуре најтоплије тачке течне и чврсте изолације) до којих доводи увођење баријера за усмеравање уља кроз намотаје са аксијалним и радијалним каналима за хлађење, користећи симулацију помоћу софтвера базираног на стационарном ДТХМ.
- Дефинисање поступка за описивање процеса укупног запрљања хладњака са воденим хлађењем који користе речну воду, у којима доминира биолошка компонента, користећи експлоатационе параметре рада трансформатора. Поступак ће бити реализован и верификован користећи податке регистроване током погона трансформатора снаге 420 MVA.
- Побољшање законитости старења изолације која уважава садржај влаге. Допринос кандидата био би део рада мулти-дисциплинарног тима, пре свега, у делу који се односи на пројекат концептуализације експерименталног трансформатора и дефинисања конструкције, тако да се остваре циљани параметри за експерименте који следе. Поред тога, допринос би био и у анализи резултата које врши мулти-дисциплинарни тим. Један од значајних крајњих резултата и доприноса је успостављање корелације између индекса деполимеризације DP папира и фурана растворених у уљу, чиме би се до стања изолације (чији је DP главни показатељ) дошло путем неинвазивне методе за процену остарелости изолације, кроз анализу узорака уља узетог из трансформатора (одређивање DP захтева узимање узорка изолације са проводника, што је веома захтевна операција).
- Теоријско разјашњење компоненти садржаних у традиционално коришћеном *hot-spot* фактору, којим би се оправдала сугестија да треба напустити приступ да се *hot-spot* фактор одређује као производ фактора неравномерних губитака и фактора неравномерног хлађења, већ да треба користити ДТХМ са променљивим губицима у проводницима као улазним подацима.

6. План истраживања и структура рада

- Анализа постојеће литературе, објављених радова и важећих стандарда из области ДТХМ и запрљања хладњака.

- Упознавање са доступним кодом софтвера за термичке прорачуне енергетских уљних трансформатора базираних на ДТХМ и сагледавање могућности његове модификације.
- Дефинисање модела и опсега важења формула за израчунавање коефицијента преласка топлоте струјањем у радијалним каналима за хлађење у намотајима без усмеравања уља, симулације у FEM/CFD софтверу, *post-processing* резултата, постављање облика и одређивање параметара једначине за прорачун коефицијента преласка топлоте. Верификација резултата поређењем са резултатима мерења на једном трансформатору и једној експерименталној лабораторијској поставци са намотајем који геометријски одговара реалном трансформаторском намотају снаге 66 MVA.
- Поређење термичких параметара намотаја са аксијалним и радијалним каналима за хлађење, у варијантама без, и са усмеравањем уља кроз радијалне канале.
- Концептуализација експерименталне поставке, припрема енергетске и аквизиционе опреме, спровођење експеримената, обрада резултата за четири испитивана типа радијатора, формирање облика формула за локалне падове притисака и одређивање параметара у њима. Коначна провера тачности ће се извршити симулацијама експерименталне поставке помоћу софтвера базираног на ДТХМ, у који су укључене формуле за локалне падове притиска у глави радијатора.
- Теоријско разјашњење *hot-spot* фактора и препорука да се симултано разматра неравномерност губитка и неравномерност хлађења по запремини намотаја, засновано на примени софтвера базираног на ДТХМ.
- Прикупљање мерења потребних за израду модела за процену фактора запрљања. Потребни су подаци о оптерећењу, температурама и протоцима у току дужег (једногодишњег) периода. Ради бољег поређења и сагледавања утицаја релевантних параметара, пожељно је прикупити податке са два ODWF трансформатора, снаге 420 MVA, са ХЕ „Ђердап I”.
- Одређивање расподеле губитака на бази познате конструкције трансформатора, на основу резултата симулација у програму FEMM (заснованом на FEM) којима се добија расподела поља у намотају, а затим одређивање губитака у конструкционим деловима трансформатора користећи резултате фабричких испитивања у огледу кратког споја. Концептуализација и израда квази-стационарног ДТХМ за потребе процене фактора запрљања.
- Развој софтверске подршке за квази-стационарни ДТХМ из претходне тачке и одређивање промене вредности фактора запрљања током дуготрајне експлоатације трансформатора. Успостављање математичког модела којим се може описати ова промена и одређивање њених параметара на бази претходно наведених резултата.
- Публикације резултата истраживања у релевантним интернационалним часописима са импакт-фактором и писање докторске дисертације.

7. Закључак и предлог

На основу приложене документације, усмене одбране теме докторске дисертације, као и непосредног увида у досадашњи рад кандидата Уроша Радомана, мастер инжењера електротехнике и рачунарства, Комисија закључује следеће:

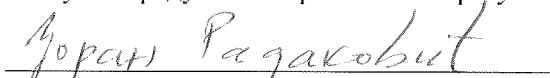
1. Кандидат испуњава све формалне и суштинске услове прописане Законом о високом образовању, Статутом Универзитета у Београду и Статутом Електротехничког факултета у Београду за израду докторске дисертације.
2. Предложена тема **"Унапређење детаљног термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена"**, односно на енглеском језику **"Improvement of the Detailed thermal-hydraulic model of oil-immersed power transformers, and extension of its application"**, је научно заснована, а резултати теме ће представљати значајан и оригиналан допринос. Тема припада ужој научној области "Енергетски претварачи и погони".

На основу претходно изложеног, Комисија предлаже Научно наставном већу Електротехничког факултета у Београду да кандидату Урошу Радоману одобри израду докторске дисертације под називом **"Унапређење детаљног термо-хидрауличног модела енергетских уљних трансформатора и проширење спектра његових примена"**, односно на енглеском језику **"Improvement of the Detailed thermal-hydraulic model of oil-immersed power transformers, and extension of its application"**, а под менторством др Зорана Радаковића, редовног професора.

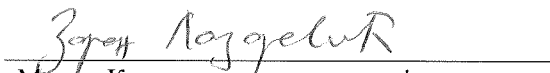
У Београду, 22. 07. 2022.

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

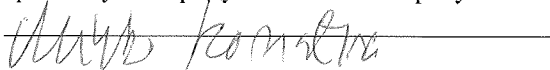
др Зоран Радаковић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



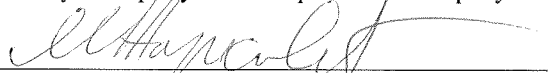
др Зоран Лазаревић, редовни професор
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



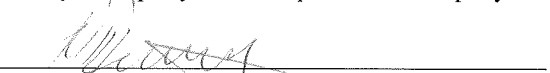
др Мирко Коматина, редовни професор
Универзитет у Београду – Машински факултет



др Милета Жарковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Младен Терзић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет



др Богдан Брковић, доцент
Универзитет у Београду – Електротехнички факултет

