

## НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

**Предмет:** Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата **Валентине Васовић**, дипл. инж.технологије.

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета бр. 35/103 од 22.04.2021. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед и оцену докторске дисертације кандидата **Валентине З. Васовић**, дипл. инж.технологије под насловом:

**„Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима”**

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

Кандидат **Валентине З. Васовић**, дипл. инж.технологије (број индекса 4041/2017) уписана је на докторске академске студије школске 2009/2010. године на Технолошко-металуршком факултету Универзитета у Београду, научна област технолошко инжењерство, ужа научна област хемијско инжењерство и положила све испите предвиђене студијским програмом, осим Завршног испита. Услед губитка статуса студента докторских студија због незавршавања студија у предвиђеном року, кандидат се школске 2017/2018 одлуком бр. 20/95-2 од 28.09.2017. уписала на другу годину докторских студија на истом студијском програму и под руководством истог ментора, при чему су јој одлуком бр. 20/161-2 од 18.08.2017. признати сви положени испити.

28.10.2019. - Кандидат **Валентина З. Васовић**, дипл. инж.технологије, пријавила је тему докторске дисертације под називом: *„Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима”*.

31.10.2019. - Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду је одлуком бр. 35/341 усвојило састав Комисије за оцену научне заснованости предложене теме.

24.12.2019 - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, на основу извештаја комисије, донета је Одлука бр. 35/412 о прихватању предлога теме докторске дисертације **Валентине З. Васовић**, дипл. инж.технологије, под називом: *„Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима”*.

За ментора ове дисертације именован је Др Александар Орловић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета.

23.01.2020. - Донета је Одлука Универзитета, 02 број: 61206-173/2-20, о сагласности на предлог теме докторске дисертације **Валентине З. Васовић**, дипл. инж. технологије, под називом: „*Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима*”.

22.04.2021. - На седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 22.04.2021., донета је Одлука бр. 35/103 о именовању чланова комисије за преглед и оцену докторске **Валентине Васовић**, дипл. инж. технологије, под називом: „*Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима*”.

## 1.2. Научна област дисертације

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације припадају научној области Технолошког инжењерства, ужа научна област хемијско инжењерство, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа.

Ментор ове докторске дисертације, др Александар Орловић, редовни професор ТМФ-а, је на основу досадашњих објављених радова и искуства компетентан да руководи израдом ове докторске дисертације.

## 1.3. Биографски подаци о кандидату

**Валентина З. Васовић** рођена је 21.11.1983. године у Београду, где је завршила основу школу и XIII београдску гимназију. На Технолошко-металуршки факултет уписала се школске 2002/2003. године, на одсеку Органска хемијска технологија и полимерно инжењерство. Дипломирала је у октобру 2008. године на Катедри за Аналитичку хемију са просечном оценом 8,73 код ментора др Љубинке Рајаковић.

Од 2008. године, запослена је на Електротехничком институту „Никола Тесла“ у Лабораторији за испитивање изолационих уља и папира, прво као приправник, а данас као виши стручни сарадник.

Школске 2009/2010. године уписала се на докторске студије на Технолошко-металуршком факултету, студијски програм Хемијско инжењерство, под руководством ментора др Александра Орловића.

Од августа 2009. до јануара 2013. године била је ангажована као сарадник на пројекту под називом „Moisture distribution and ageing of vegetable and synthetic ester oils in transformer insulation“ израђеног за потребе реномираног произвођача трансформатора са седиштем у Паризу (Ageva T&D). У оквиру овог пројекта била је ангажована на испитивању физичких, хемијских и електричних својстава природних естара, пре и након експеримената убрзаног старења уља, као и феномена расподеле воде у систему уље-папир на различитим температурама. Проучавана је могућност примене ових уља као изолационих флуида у трансформаторима.

Од јануара 2011. године укључена је као истраживач-приправник, а касније и као истраживач сарадник, у реализацији два пројекта финансирана од стране Министарства науке и технолошког развоја и то: пројекат III 45019 „Синтеза, развој технологије добијања и примена наноструктурних мултифункционалних материјала дефинисаних својстава“, и пројекат технолошког развоја TP 33024 „Повећање енергетске ефикасности, поузданости и расположивости електрана ЕПС-а утврђивањем погонских дијаграма генератора и применом нових метода испитивања и даљинског надзора“.

Валентина Васовић била је сарадник на изради већег броја студија и интерних стандарда, везаних за одржавање енергетских трансформатора, за потребе Електропривреде Србије и Електромреже Србије.

Област научно-истраживачког рада током докторских студија Валентине Васовић обухвата истраживања у области хемијских и хемијско инжењерских феномена који се одигравају у изолационим системима енергетских трансформатора, а који критично утичу на енергетске и применске карактеристике ових уређаја.

## 2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

### 2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата **Валентине З. Васовић**, „*Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима*” написана је на 176 нумерисаних страна и садржи 7 поглавља: *Увод, Изолациони системи енергетских трансформатора, Методе за одређивање карактеристика и степена деградације папирно/уљне изолације у погонским условима трансформатора, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература*. Дисертација садржи и 8 табела, 99 слика, као и 105 литературних навода. На почетку дисертације дат је Извод (на српском и енглеском језику), док је након Литературе дата биографија аутора, изјава о ауторству, изјава о истоветности штампане и електронске верзије, изјава о коришћењу и изјава о оригиналности тезе. По форми и садржају, поднети рад задовољава све стандарде Универзитета у Београду за докторску дисертацију.

### 2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

У овој докторској дисертацији истраживани су феномени расподеле воде између изолационог уља минералног и биљног порекла и изолационог крафт папира и пресборда у енергетским трансформаторима. Осим тога, спроведено је поређење старења изолационих система са изолационим уљем минералног и биљног порекла, као и утицај присуства воде на брзину деградације изолационог крафт папира, у експерименталним енергетским трансформаторима, који су по конструкцији одговарали трансформаторима великих снага, као и у одговарајућим лабораторијским моделима.

У поглављима *Увод* и *Изолациони системи енергетских трансформатора* описане су најважније карактеристике изолационих материјала који чине изолациони систем енергетских трансформатора пуњених уљем, чији су бакарни проводници изоловани крафт папирном изолацијом. У потпоглављу *Изолациона уља* описан је хемијски састав и основне применске карактеристике изолационих уља минералног и биљног порекла. Посебна пажња посвећена је отпорности изолационих уља минералног и биљног порекла према оксидацији. У потпоглављу *Деградација целулозне изолације енергетских трансформатора* описан је састав чврсте изолације енергетских трансформатора, као и утицај најважнијих агенаса на механизме деградације целулозне изолације у условима који владају током експлоатације енергетских трансформатора. У потпоглављу *Деградација целулозне изолације и животни век енергетских трансформатора* објашњена је практична важност праћења степена деградације изолационог система енергетских трансформатора током експлоатације. Приказане су постојеће методе за процену остарелости папирне изолације, односно за процену потрошеног животног века према стандарду ИЕС 60076-7 као и на основу измереног садржаја деривата фурана у уљу. Осим тога, приказана је и тренутно прихваћена теорија о кинетици деградације целулозне изолације током експлоатације енергетских трансформатора

пуњених минералним уљем која се заснива на Arrhenius-овом термокинетичком моделу. У потпоглављу *Процена преосталог животног века енергетских трансформатора*, дате су постојеће методе за процену преосталог животног века енергетских трансформатора.

У поглављу *Методе за одређивање карактеристика и степена деградације папирно/уљне изолације у погонским условима трансформатора* описане су постојеће хемијске методе испитивања уља које служе за праћење степена деградације изолационог система енергетских трансформатора током експлоатације. Приказане су теоријске основе и значај методе за утврђивање погонске исправности енергетских трансформатора на основу измереног садржаја гасова растворених у уљу, описане су најважније физичке, хемијске и електричне карактеристике изолационих уља које је неопходно периодично испитивати током експлоатације трансформатора у циљу провере њихове даље употребљивости. У посебном потпоглављу обрађена је проблематика присуства воде у изолационом систему енергетских трансформатора и описане су методе за одређивање садржаја воде у уљу и индиректне методе за процену овлажености целокупног изолационог система уље/целулоза енергетских трансформатора током погона на основу анализе уља. У последњем потпоглављу дате су основе методе и циљ мерења садржаја одређених деривата фурана у циљу процене остарелости целулозне изолације трансформатора.

У поглављу *Експериментални део* дат је опис материјала и аналитичких метода коришћених у оквиру експерименталног рада. У оквиру потпоглавља *Експериментални поступак* приказ поступака експеримената спроведених у оквиру дисертације организован је у три целине. У првој целини описан је поступак формирање равнотежних дијаграма садржаја воде у папиру, пресборду и минералном, односно биљном уљу. У другој целини приказан је опис експеримента убрзаног старења папирне изолације у минералном инхибираном, минералном неинхибираном и биљном инхибираном изолационом уљу на температури од 140 °С с циљем да се упореде применске особине биљних изолационих уља са минералним. У последњој целини дат је опис експеримента убрзаног старења два експериментална трансформатора са бакарним проводницима и изолационим крафт папиром, пуњена минералним уљем, на температури од 105 °С, са два различита почетна садржаја воде у целулозној изолацији (1 -1,5% и 3-4%). Дат је основни опис конструкције експерименталних трансформатора и опис одговарајућих лабораторијских модела у ерленмајерима који су садржали основне изолационе материјале у масеним односима истим као код експерименталних трансформатора, а у циљу поређења феномена који се јављају током деградације изолационог система реалних трансформатора и у лабораторијским симулацијама.

У поглављу *Резултати и дискусија* је дат приказ резултата добијених током спроведених експеримената описаних у трећем поглављу, при чему су резултати груписани у три одвојена дела, на исти начин као и опис самих експеримената. У оквиру резултата првог експеримента, приказани су новоформирану дијаграми равнотежне расподеле воде у систему папир/пресборд/минерално изолационо уље и у систему папир/пресборд/биљно уље и приказано је поређење процена садржаја воде у целулозној изолацији на основу новоформираних равнотежних дијаграма и равнотежних дијаграма често цитираних у литератури. Поред тога, приказано је и поређење процена садржаја воде у изолационом систему енергетских трансформатора на основу новоформираних дијаграма и применом диелектричне методе испитивања трансформатора. Резултати добијени у оквиру другог експеримента дати су као упоредни приказ резултата спроведених испитивања на два минерална изолациона уља и једном биљном изолационом уљу. Приказани су резултати испитивања садржаја гасова растворених у уљу, резултати испитивања најважнијих применских својстава изолационих уља, резултати апсолутних садржаја воде у уљу, као и испитивање садржаја деривата фурана растворених у уљу. Осим резултата испитивања уља, дати су и резултати испитивања остарелости целулозне изолације коју су чинили изолациони папир и пресборд, као и криве зависности степена полимеризације папира од садржаја

деривата фурана у уљу. У трећем потпоглављу дати су резултати добијени у оквиру трећег експеримента који обухватају резултате добијене испитивањем изолационог уља и папира из два експериментална трансформатора и два лабораторијска модела. Приказани резултати испитивања уља обухватају резултате добијене испитивањем садржаја гасова растворених у уљу, садржаја воде растворене у уљу и најважнијих физичких, хемијских и електричних карактеристика уља. Експериментални резултати испитивања изолационог папира обухватају резултате добијене испитивањем средњег степена полимеризације изолационог папира и садржаја воде у папиру. На основу резултата добијених у оквиру трећег експеримента изведена је и формула зависности предекспоненцијалног фактора А из Arrheniss-овог термокинетичког модела. Такође, презентоване су и криве зависности степена полимеризације папирне изолације од садржаја деривата фурана у уљу изведене за два експериментална трансформатора и два лабораторијска модела са различитим садржајем воде у целулозној изолацији.

У поглављу *Закључак* изведени су закључци ове докторске дисертације и побројани најважнији доприноси остварених резултата. Описани су услови за које су формиран нови равнотежни дијаграми садржаја воде у изолационом уљу, папиру и пресборду, затим начин на који је остварена потврда могућности примене ових дијаграма у пракси, као и уочене разлике у расподели воде између изолационих материјала у случају минералних и биљних изолационих уља. Описани су уочени феномени приликом деградације изолационог система папир/биљно уље и разлике у односу на деградацију изолационог система са минералним уљима. Назначени су услови за које су формиране нове корелационе криве степена полимеризације изолационог папира и садржаја деривата фурана растворених у уљу. Објашњено је на који начин је унапређена метода за процену остарелости папирне изолације потрошеног и преосталог експлоатационог века енергетских трансформатора пуњених минералним уљем са различитим садржајем влаге у изолационом систему.

У делу *Литература* наведене су све референце цитиране у докторској дисертацији, које су релевантне за истраживање, као и радови проистекли током израде ове дисертације.

### 3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

#### 3.1. Савременост и оригиналност

Испитивање уља представља прилично једноставан, брз и релативно јефтин начин да се утврди исправност рада енергетских трансформатора, односно детектује низ различитих типова квара, али и да се утврди остарелост и овлаженост целулозне изолације.

Данас постоји више хемијских метода испитивања изолационог уља, али се ради на унапређењу постојећих и развоју нових метода. Методе су развијене пре свега за енергетске трансформаторе пуњене минералним уљем, а у годинама које долазе потребно је испитати њихову ефикасност код трансформатора пуњених биљним уљем. Такође, потребно је предвидети како ће се изолациони систем биљно уље/изолациони крафт папир понашати приликом употребе у енергетским трансформаторима у поређењу са системом минерално уље/крафт папир.

Присуство воде у целулозној изолацији енергетских трансформатора представља веома важно техничко питање са више аспеката. Садржај воде у целулозној изолацији енергетских трансформатора није могуће одредити директним мерењима, већ је могуће вршити искључиво индиректне процене електричним испитивањима или преко измереног садржаја воде у уљу уз употребу одговарајућих равнотежних дијаграма. С обзиром да су електричне методе скупе и да се могу вршити само док се трансформатор налази ван погона и да процена преко садржаја воде у уљу представља бржи, јефтинији и лакши начин, доста се радило на развоју ове методе.

У литератури постоји већи број равнотежних дијаграма при чему се поступак и материјали који су у експериментима коришћени прилично разликују, а често нису сасвим јасно дефинисани. Многи од ових експеримената су осмишљени тако да су се материјали налазили раздвојени у ваздуху или вакууму, при чему је вршено уравнотежавање парцијалних притисака и напона водене паре појединачних материјала, а затим су комбиновањем добијених резултата добијени тзв. сорпциони дијаграми.

У оквиру ове дисертације формиран су равнотежни дијаграми за два прецизно дефинисана изолациона система: изолациони крафт папир/пресборд/минерално изолационо уље и изолациони крафт папир/пресборд/биљно изолационо уље за дефинисани масени однос целулоза/уље: папир 4%, пресборд 6% уље 90%, за температуре у опсегу 40 – 120 °С и почетни садржај влаге 0,5% – 5%. Равнотежни садржаји воде постизани су држањем папира и пресборда заједно у уљу, на датим температурама довољно дуго времена, чиме је омогућено постизање такве расподеле влаге у материјалима која одговара реалним условима који владају у енергетским трансформаторима, јер су на овај начин укључени утицаји међусобне интеракције материјала са молекулима воде, као и међу самим материјалима.

Кинетика деградације изолационог крафт папира енергетских трансформатора је истраживана дужи низ година, с циљем развоја методе за процену остарелости папирне изолације и предвиђање будуће брзине деградације изолационог папира, односно за процену потрошеног и преосталог животног века енергетског трансформатора. Један од начина за процену стања папирне изолације јесте мерење садржаја деривата фурана у уљу који настају приликом деградације папирне изолације уз коришћење одговарајућих корелационих једначина. Данас је у литератури доступно неколико корелационих једначина, и то за минерално уље и крафт папир, али је њихов главни недостатак што не узимају у обзир параметре који утичу на растворљивост деривата фурана у уљу, као што су присуство влаге и киселина у изолационом систему. С друге стране, предвиђање брзине деградације папирне изолације у доступној литератури, углавном је базирана на зависности брзине деградације од температуре. С обзиром да брзина деградације папирне изолације зависи и од присуства воде и кисеоника у изолационом систему, за сада само истраживања аутора *Lelekakis* и *Martin* дају зависност брзине деградације од садржаја воде и кисеоника. Убрзаним старењем два експериментална трансформатора са различитим почетним садржајем воде у изолационом систему, на температури од 105 °С формиране су криве зависности степена полимеризације крафт папира од садржаја деривата фурана у минералном уљу за температуру од 105 °С, за низак садржај кисеоника у уљу (< 4000 мг/кг) и умерен садржај киселина у уљу. Осим тога формирана је једначина која уважава утицај садржаја влаге на брзину старења крафт папира, чиме је унапређен Arrhenius-ов термодинамички модел старења папирне изолације. Ови резултати имају велику предност у односу на друге резултате које се могу наћи у литератури, јер су формиран старењем енергетских трансформатора, за разлику од већине резултата приказаних у литератури који су остварени експериментима спроведеним у лабораторијским условима.

На основу опсежног прегледа литературе може се закључити да се истраживања у оквиру ове докторске дисертације уклапају у светске трендове и указују на значај и актуелност проучавање проблематике.

Савременост и оригиналност истраживања приказаних у овој докторској дисертацији потврђени су публикавањем више радова из тезе у истакнутим међународним часописима, у часопису националног значаја и саопштењима на скуповима међународног и националног значаја.

### 3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

Током израде докторске дисертације кандидат је извршио преглед научне и стручне литературе из релевантних научних области везаних за проблематику докторске тезе. Велика

већина прегледане научне литературе састојала се од научних радова публикованих у водећим међународним часописима од стране еминентних стручњака из области и проблематике предметне докторске тезе. Тиме је кандидат стекао потпун увид у до сада објављене резултате испитивања могућности процене садржаја влаге у изолационом крафт папиру енергетских трансформатора пуњених минералним уљем на основу испитивања уља, као и објављене резултате истраживања кинетике деградације изолационог крафт папира у енергетским трансформаторима пуњеним минералним уљем и могућности процене остарелости папирне изолације на основу измереног садржаја деривата фурана у уљу. Након стицања комплетног увида у досадашње објављене резултате кандидат је осмислио експерименте за формирање равнотежних дијаграма, као и за изучавање кинетике деградације изолационог крафт папира и формирање зависности степена полимеризације папира од садржаја деривата фурана у уљу за различите садржаје воде у изолационом систему енергетских трансформатора.

Верификацију експерименталних и анализираних резултата садржаних у овој тези, кандидат је потврдио публикавањем више радова у истакнутим међународним часописима, чиме је дао свој научни допринос на пољу предметне проблематике.

У овој докторској дисертацији укупно је наведено 105 референци, које обухватају савремени пресек знања у предметној области, како на међународном нивоу тако и у Републици Србији. Наведене референце јасно указују на квалитативни помак који је остварен израдом ове докторске дисертације у контексту савремених трендова у енергетици високог напона и примени биобновљивих ресурса у изолационим системима енергетских трансформатора.

### 3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

У пријави докторске тезе постављени су задаци који су остварени коришћењем савремених експерименталних и теоретских метода.

Коришћене су следеће експерименталне методе:

- Експериментално утврђивање равнотежних садржаја влаге у изолационом уљу и папиру на 7 различитих температура за 5 садржаја влаге. Испитивање садржаја воде у уљу и папиру изведено је аналитичком техником Karl Fischer кулометријске титрације, у складу са стандардом IEC 60814:1997 (SRPS EN 60814:2008).
- Експериментално утврђивање механизма деградације изолационог уља и папира током експеримената вештачког старења два реална трансформатора и два лабораторијска модела трансформатора са различитим почетном садржајем влаге у изолацији.
- Испитивање садржаја воде у уљу и папиру вршено је аналитичком техником Karl Fischer кулометријске титрације, у складу са стандардом IEC 60814:1997 (SRPS EN 60814:2008).
- Утврђивање степена деградације папирне изолације вршено је анализом средњег вискозиметријског степена полимеризације папира помоћу модификоване Ubbelohde капиларе, у складу са стандардом IEC 60450:2004.
- Испитивање продуката деградације папирне изолације растворених у уљу (деривати фурана) вршено је техником течне хроматографије (HPLC), у складу са стандардом IEC 61198:1993 (SRPS EN 61198:2010).
- Испитивање квалитета изолационог уља након експеримента вештачког старења изведено је у складу са стандардом IEC 60422:2013 и испитане су следеће применске особине: диелектрична чврстоћа уља, фактор диелектричних губитака и специфична електрична отпорност уља, садржај киселих продуката старења у уљу и међуповршински напон уље-вода.

Обрада експерименталних резултата вршена је у програму Microsoft Office 2010, Microsoft Excel.

### 3.4. Применљивост остварених резултата

Остварени резултати приказани у овој докторској дисертацији имају значајну примену у одржавању енергетских трансформатора пуњених минералним уљем са изолационим крафт папиром око бакарних проводника.

На основу резултата првог дела истраживања унапређена је метода за процену садржаја воде у папирној изолацији енергетских трансформатора, што је потврђено поређењем резултата добијених употребом новоформираних дијаграма и резултата електричних мерења спроведених на трансформаторима из експлоатације. На основу резултата другог дела истраживања унапређена је метода за процену потрошеног и преосталог животног века енергетских трансформатора пуњених минералним изолационим уљем са изолационим крафт папиром на бакарним намотајима базирана на испитивању уља.

### 3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

Кандидат **Валентина З. Васовић** је испољила изузетну самосталност и стручност у осмишљавању, припреми и реализацији експеримената и техника за карактеризацију изолационих материјала у електричним трансформаторима, а током анализе и приказивања резултата је показала систематичност и креативност пружајући значајан научни допринос у научним областима које су до сада биле делимично истражене.

Валентина Васовић је ангажована у научно-истраживачком раду од тренутка запослења на Електротехничком институту Никола Тесла. Учествовала је на пословима организације и спровођења истраживања, као и на анализи добијених резултата на више различитих пројеката, укључујући и пројекте финансиране од стране Министарства науке и технолошког развоја

На основу изнетих чињеница, Комисија је мишљења да је кандидат квалификован и да поседује све квалитете који су неопходни за самосталан научно истраживачки рад.

## **4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС**

### 4.1. Приказ остварених научних доприноса

Докторска дисертација кандидата Валентине Васовић, дипл. инж. технологије, под називом: *„Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима”* пружа значајан научни допринос у области одржавања енергетских трансформатора, који се огледа у следећем:

- утврђено је да постоје одређене разлике у расподели влаге између различитих врста целулозних материјала у изолационом систему енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима, при чему су ове разлике израженије у случају биљних уља,
- омогућена је тачнија процена садржаја влаге у изолационом папиру реалних енергетских трансформатора у погону на основу новоформираних дијаграма равнотежних садржаја воде у изолационом папиру, пресборду и минералном и биљном уљу,
- квантификован је утицај садржаја воде на брзину деградације изолационог система трансформатора са минералним уљем,



- уочене су одређене разлике у механизмима деградације изолационог система реалног трансформатора и лабораторијских модела под утицајем влаге и температуре,
- унапређени су постојећи алати за процену остарелости реалних трансформатора у погону, њихова поузданост и расположивост, као и омогућавање бољег планирања инвестиција тачнијом проценом преосталог животног века енергетских трансформатора.

#### 4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања обухваћена овом докторском дисертацијом конципирана су на основу јасно дефинисаних циљева и претходне детаљне анализе литературе релевантне за област истраживања. Методе примењене у изради докторске дисертације у складу су са савременим методама и представљају мултидисциплинарни приступ истраживању комплексних хемијско инжењерских система са применом у енергетици.

У оквиру ове дисертације формиран су равнотежни дијаграми за два прецизно дефинисана изолациона система са масеним односом целулоза/уље које одговара енергетским трансформаторима великих снага, при чему су укључени утицаји међусобне интеракције материјала са молекулима воде, као и међу самим материјалима, што у случају постојећих равнотежних дијаграма није био случај. Такође, узете су у обзир и разлике у садржају воде међу различитим целулозним материјалима (папир и пресборд), при чему је овај феномен више изражен у случају биљних уља.

Квантификација утицаја садржаја воде на брзину деградације папирне изолације и успостављање корелација између степена деградације папирне изолације и садржаја деривата фурана у уљу за различите садржаје воде, представља значајно унапређење научних знања у овој области, нарочито јер су извршени на основу резултата убрзаног старења модела енергетских трансформатора, а не у лабораторијским условима. Такође, предложени модел којим се омогућава симулација старења, као и предикција корисног животног века изолационих система енергетских трансформатора, представља значајно унапређење у предметној области у односу на претходно доступне методе и технике.

#### 4.3. Верификација научних доприноса

Кандидат **Валентина З. Васовић** је резултате добијене у току израде ове дисертације потврдила објављивањем радова у часописима међународног и националног значаја и саопштавањем радова на међународним скуповима. Резултати досадашњег научно-истраживачког рада кандидата у овој области приказани су у 3 (три) рада објављена у часописима међународног значаја (ознака групе M20: врста резултата M22), 1 (један) рад објављен у зборнику скупа међународног значаја штампаног у целини или у изводу (ознака групе M30: врста резултата M33), 1 (један) рад објављен у часопису националног значаја (ознака групе M50: врста резултата M53) и 4 (четири) рада објављена у зборницима скупова националног значаја штампана у целини (ознака групе M60: врста резултата M63).

#### Радови објављени у истакнутим часописима међународног значаја (M22):

1. **V.Vasović**, J.Lukić, C.Perrier, M.Coulibably: „Equilibrium Charts for Moisture in Paper and Pressboard Insulations in Mineral and Natural Ester Transformer Oils“, - *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 30, no. 2, pp. 10-16, 2014 (**IF= 1.643**) Engineering, Electrical & Electronic (92/249) (ISSN 0883-7554) DOI: 10.1109/MEI.2014.6749568.
2. **V.Vasovic**, J.Lukic, D.Mihajlovic, B.Pejovic, U.Radoman, Z.Radakovic, A.Orlovic: „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*, vol. 26, no. 6, pp. 1840 – 1846, 2019 (IF= 2.554), Engineering, Electrical & Electronic (120/266) (ISSN: 1558-4135), DOI:10.1109/TDEI.2019.008183.

3. **V. Vasovic**, J.Lukic, D.Mihajlovic, B.Pejovic, M.Milovanovic, U.Radoman, Z.Radakovic: „Aging of Transformer Insulation - Experimental Transformers and Laboratory Models with different Moisture Contents: Part II – Moisture Distribution and Aging Kinetics“, *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6 pp. 1847 – 1852, 2019 (IF=2.554), Engineering, Electrical & Electronic (120/266) (ISSN: 1558-4135), DOI: 10.1109/TDEI.2019.008184.

#### Саопштења са међународних скупова штампана у целини (M33):

1. **V. Vasovic**, D.Mihajlovic, J.Lukic.: "Experiences in transformer diagnostics derived from oil analysis", *Conference of experts "Isoliersysteme in der Hochspannungstechnik"*, Proceedings on cd rom, Graz, Austria, 2017.

#### Радови објављени у часописима националног значаја (M53):

1. **V. Vasović**, D.Mihajlović D, J.Janković, J.Lukić: Procena stanja papirne izolacije energetskih transformatora na osnovu sadržaja 2-furfurala u mineralnom izolacionom ulju korigovanog na referentnu temperaturu od 20 °C, *Zbornik radova, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla"*, 2019; vol 29, br. 29, str. 45-56, (ISSN: 0350-8528), DOI:10.5937/zeint9-23912.

#### Саопштења са скупова националног значаја штампана у целини (M63):

1. **V. Mandić**, D. Nikolić, J. Lukić: Izolaciona ulja biljnog porekla i komparativna analiza sa mineralnim uljima, *Zbornik radova 30. savetovanja CIGRE Srbija*, cd rom, Zlatibor, Srbija, 2011.
2. **V. Vasović**, D.Mihajlović, J. Janković, K.Drakić, J. Lukić, “Analiza sadržaja gasova rastvorenih u ulju – značaj u dijagnostici pogonskog stanja transformatora”, *Zbornik radova X savetovanja CIRED Srbije*, cd rom, Vrnjačka Banja, Srbija, 2016.
3. **V. Vasović**, D. Mihajlović, J. Janković, J. Lukić, "Dijagnostika stanja energetskih transformatora na osnovu analize ulja – značaj baze podataka i iskustva iz prakse", *Zbornik radova 33. savetovanja CIGRE Srbije*, cd rom, Zlatibor, Srbija, 2017.
4. **V. Vasović**, J.Janković, D.Mihajlović, J.Lukić, Đ.Jovanović, D.Žukovski, M. Cvijanović, „Interesantni slučajevi dijagnostike stanja energetskih transformatora nakon kvara i havarije tokom 2017 i 2018 godine: Unapređenje dijagnostike primenom novih metoda i post-mortem analiza“, *Zbornik radova 34. savetovanje CIGRE Srbije*, cd rom, Vrnjačka Banja, Srbija, 2019.

## 5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу претходно наведеног, мишљење Комисије је да докторска дисертација кандидата **Валентине З. Васовић**, дипл. инж. технологије, под називом „**Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима**” представља оригиналан научни допринос предметне области истраживања. Оригиналноост докторске дисертације кандидата је потврђена објављивањем више радова у часописима међународног значаја. Предмет и циљеви, који су постављени, су јасно наведени и у потпуности остварени. Комисија је мишљења да је кандидат током израде докторске дисертације показао самосталност и оригиналност у научно-истраживачком раду као и свим фазама израде ове докторске дисертације.

Имајући у виду квалитет, обим и научни допринос постигнутих и приказаних резултата, Комисија предлаже Наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду, да се докторска дисертација под називом „**Расподела влаге и**

*деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима*” кандидата **Валентина З. Васовић** прихвати, изложи на увид јавности и упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду.

Београд 03.06.2021.

#### ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
Др Сандра Глишић, доцент  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Ивана Лукић, научни сарадник  
Универзитет у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....  
Др Зоран Радаковић, редовни професор  
Универзитет у Београду, Електротехнички факултет

.....  
Др Ненад Карталовић, научни сарадник  
Универзитет у Београду, Институт Никола Тесла

.....  
Др Јелена Лукић, научни сарадник  
Универзитет у Београду, Институт Никола Тесла