

Факултет Технолошко-металуршки

УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ

35/217

(Број захтева)

2. 9. 2024.

(Датум)

Веће научних области техничких наука

(Назив већа научне области коме се захтев упућује)

ЗАХТЕВ

за давање сагласности на одлуке о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и о именовању комисије за одбрану

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 4. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације:

КАНДИДАТ Драгиња (Предраг) Михајловић,

(име, име једног од родитеља и презиме)

студент докторских студија на студијском програму : Хемијско инжењерство

пријавио је докторску дисертацију под називом:

Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора

Технолошко инжењерство

из научне области:

Универзитет је дана 22. 1. 2024. својим актом под бр. 61206-185/2-24 дао сагласност на предлог теме докторске дисертације која је гласила:

Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора

Име и презиме ментора: др Александар Орловић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршког факултета.

Комисија за оцену докторске дисертације именована је на седници одржаној 25. 4. 2024.

одлуком факултета под бр. 35/93, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Сандра Глишић	доцент	Хемијско инжењерство	ТМФ
2.	Др Марко Стаменић	доцент	Хемијско инжењерство	ТМФ
3.	Др Јелена Лукић	виши научни сарадник	Хемијско инжењерство	Електротехнички Институт "Никола Тесла"

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Датум стављања извештаја Комисије и докторске дисертације на увид јавности **12. 6. 2024.**

Наставно-научно веће факултета усвојило је извештај Комисије за оцену докторске дисертације на седници одржаној дана **28. 8. 2024.**

Комисија за одбрану докторске дисертације именована је на седници одржаној **28. 8. 2024.**

одлуком факултета под бр. 35/220, у саставу:

	Име и презиме члана комисије	звање	научна област	Установа у којој је запослен
1.	Др Сандра Глишић	доцент	Хемијско инжењерство	ТМФ
2.	Др Марко Стаменић	доцент	Хемијско инжењерство	ТМФ
3.	Др Јелена Лукић	виши научни сарадник	Хемијско инжењерство	Електротехнички Институт “Никола Тесла”

Напомена: уколико је члан Комисије у пензији навести датум пензионисања.

Студент је поново уписан на трећу годину докторских студија школске 2021/2022. године. На захтев студента декан је донео Решење број 20/181 од 2. 10. 2023. године о продужењу рока за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до краја 30. 9. 2024. године.

ДЕКАН ФАКУЛТЕТА
др Петар Ускоковић, редовни професор

- Прилози:
1. Одлука Наставно-научног већа о усвајању извештаја Комисије за оцену докторске дисертације и одлука о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације
 2. Извештај Комисије о оцени докторске дисертације
 3. Примедбе на извештај Комисије о оцени докторске дисертације (уколико их је било) и мишљење Комисије о примедбама

Напомена: Факултет доставља Универзитету захтев са прилозима у електронској форми и у једном писаном примерку за архиву Универзитета



Република Србија
Универзитет у Београду
Технолошко-металуршки факултет

РЕПУБЛИКА СРБИЈА
УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ
ТЕХНОЛОШКО-МЕТАЛУРШКИ ФАКУЛТЕТ

Бр. 20/181

02. 10. 2023 год.
БЕОГРАД

На основу члана 101. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета у Београду бр. 201/2018") и члана 76. Статута Технолошко-металуршког факултета у Београду, као и захтева студента за продужење рока за завршетак студија Декан доноси

РЕШЕЊЕ

о продужењу рока за завршетак студија

Студенту Драгиња Михајловић, број индекса 2021/4041, уписана у трећу годину докторских академских студија школске 2021/2022 године продужава се рок за завршетак студија до истека троструког броја школских година потребних за реализацију уписаног студијског програма, односно до 30.09.2024 године.



ДІVа

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 52. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 28.8.2024. године, донета је

О Д Л У К А

о прихватању Реферата о оцени докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије у саставу: др Сандра Глишић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Марко Стаменић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Јелена Лукић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Електротехнички Институт “Никола Тесла”, о прегледу и оцени урађене докторске дисертације под називом: **„Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора“** коју је поднела Драгиња Михајловић, дипломирани инжењер технологије и упућује се на сагласност Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду. Веће научних области техничких наука Универзитета у Београду дало је сагласност на предлог теме докторске дисертације Драгиње Михајловић, под називом **„Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора“** Одлуком број: 61206-185/2-24 од 22. 1. 2024 године.

Верификација научних доприноса:

Категорија M21:

1. D. Mihajlovic, V. Vasovic, J. Lukic, *Development of New Accelerated Aging Test for Comparison of the Quality of Different Insulating Papers Based on Cellulose*, Polymers, <https://doi.org/10.3390/polym15112556>, 2023, Vol. 15, No. 2556, (IF= 5.0, 14/86 Polymer Science) ISSN 2073-4360

Категорија M23:

1.D. Mihajlovic, V. Ivancevic, V. Vasovic, J. Lukic, *Cellulose Degradation and Transformer Fault Detection by the Application of Integrated Analyses of Gases and Low Molecular Weight Alcohols Dissolved in Mineral Oil*, Energies, <https://doi.org/10.3390/en15155669>, 2022, Vol. 15, Issue 15, No. 5669, (IF= 3.333, 78/121 Energy&Fuels) ISSN 1996-1073.

Одлуку доставити: Већу научних области техничких наука Универзитета, ментору, Служби за наставно-студентске послове и Архиви факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

ДV

На основу чл. 40. став 3. Закона о високом образовању, чл. 112. став 3. Статута Универзитета у Београду, чл. 88. став 3. Статута ТМФ-а и чл. 52. Правилника о докторским студијама ТМФ, на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 28.8.2024. године, донета је

О Д Л У К А

о именовању Комисије за одбрану докторске дисертације

Именује се Комисија за одбрану докторске дисертације **Драгиње Михајловић**, дипломираног инжењера технологије, са темом под називом „Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора“, у саставу:

1. Др Сандра Глишић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
2. Др Марко Стаменић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет,
3. Др Јелена Лукић, виши научни сарадник Универзитета у Београду, Електротехнички Институт “Никола Тесла”.

Одлуку доставити: Одлуку доставити: члановима Комисије, Универзитету у Београду, Служби за наставно-студентске послове и Архиви Факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ

Предмет: Реферат о урађеној докторској дисертацији кандидата Драгиње (Предраг) Михајловић, дипл. инж. техн.

Одлуком бр. 35/93 од 25.04.2024. године, именовани смо за чланове Комисије за преглед, оцену и одбрану докторске дисертације кандидата Драгиње Михајловић под насловом

„КОНТАМИНАЦИЈА ПОЛИХЛОРОВАНИМ БИФЕНИЛИМА И ХЕМИЈСКИ ПРОЦЕСИ ДЕГРАДАЦИЈЕ ИЗОЛАЦИОНОГ СИСТЕМА ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА“

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

- Докторске студије на Технолошко-металуршком факултету, студијски програм хемијско инжењерство је уписала први пут 2010. године. Након истека рока за завршетак студија, 2021. године је уписана на трећу годину студија на исти студијски програм, при чему су јој признати сви положени испити. У оквиру докторских студија положила је све испите предвиђене студијским планом и програмом са просечном оценом 9.45, завршни испит је одбранила са оценом 10, пред комисијом др Александар Орловић, др Сандра Глишић и др Никола Никачевић.
- Према решењу број 20/181 од 02.10.2023. Драгињи П. Михајловић је продужен рок за завршетак докторских студија.
- **03.11.2023.** кандидат Драгиња Михајловић је пријавила тему докторске дисертације под називом „Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора“.
- **09.11.2023.** Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета, Универзитета у Београду је донело Одлуку бр. 35/256 о именовању Комисије за оцену подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом „Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора“.
- **26.12.2023.** на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета, у Београду, по Одлуци бр. 35/314 прихваћен је Реферат Комисије о подобности теме и кандидата за израду докторске дисертације и научне заснованости теме под насловом „Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора“, кандидата Драгиње П.

- Михајловић, дипл. инж.технологије. За ментора је именован др Александар Орловић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду.
- **22.01.2024.** на седници Већа научних области техничких наука Универзитета у Београду дата је сагласност на предлог теме докторске дисертације кандидата Драгиње П. Михајловић под насловом *„Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора”* (Одлука 02 бр.61206-185/2-24).
 - **25.4.2024.** Наставно-научно веће Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду донело је Одлуку бр. 35/93 о именовању чланова Комисије за оцену и одбрану докторске дисертације Драгиње П. Михајловић, дипл. инж.технологије, под називом: *„Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора”*, у саставу: др Сандра Глишић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, др Марко Стаменић, доцент Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет и др Јелена Лукић, виши научни сарадник Електротехничког института Никола Тесла акционарско друштво Београд.

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 докторске дисертације је др Александар Орловић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета у Београду који је на основу објављених публикација и искуства компетентан да руководи израдом ове дисертације.

1.3. Биографски подаци о кандидату

Кандидат **Драгиња Михајловић**, дипл. инж. техн. је рођена 28.07.1982. године у Београду где је завршила основну школу као и средњу школу, Х гимназију „Михајло Пупин”. Технолошко-металуршки факултет уписује 2001. На Катедри за хемијско инжењерство дипломирала је 2008, са просечном оценом 8,22, код ментора проф. др Мирјане Кијевчанин. Докторске студије на Технолошко-металуршком факултету, студијски програм хемијско инжењерство је уписала први пут 2010. године. Након истека рока за завршетак студија, 2021. године је уписана на трећу годину студија на исти студијски програм, при чему су јој признати сви положени испити.

Од 2010. године запослена је у Електротехничком институту Никола Тесла у Београду, у склопу специјализоване лабораторије за испитивање изолационог уља и папира, прво као приправник а данас као стручни сарадник.

Драгиња Михајловић, дипл. инж. техн. у Електротехничком институту Никола Тесла је ангажована на пословима испитивања и дијагностике стања енергетских трансформатора, изради студија и пројеката. Учествовала је у увођењу нових метода за квантитативно одређивање садржаја метанола и етанола као и квантитативно одређивање садржаја елементарног сумпора у изолационим уљима помоћу гасне хроматографије. Организује и прати реализацију послова деконтаминације уља и трансформатора контаминираних полихлорованим бифенилима (ПХБ). Била је члан CIGRE радне групе D1.52 „Moisture Measurement in Insulating Fluids and Transformer Insulation—an Evaluation of Solid State Sensors and Chemical Methods“ у периоду од 2014 до 2018. Као члан одбора учествује у спровођењу и унапређењу интегрисаног система менаџмента квалитетом у Институту. Одлуком научног већа Института, Драгиња је 2012. године изабрана у звање истраживач сарадник. Област научно-истраживачког рада током докторских студија Драгиње Михајловић обухвата испитивање контаминације минералних изолационих уља ПХБ-ом у

Републици Србији, процес деконтаминације минералних изолационих уља која садрже ПХБ и испитивање квалитета изолационог система трансформатора.

Од 2010. до 2013. године била је ангажована као сарадник на три пројекта на тему расподеле влаге и старења папирне изолације импрегнисане минералним и биљним уљима израђене за потребе Areva T&D/ALSTOM Grid (данас General Electric). У оквиру ових пројеката 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 биљних уља као изолационих флуида у трансформаторима.

Од 2014. до 2017. године била је ангажована на изради Студије „Истраживање феномена деградације изолационог система и процена животног века (експериментални трансформатори на Тент-у)” урађене за Јавно предузеће Електропривреда Србије која је имала за циљ унапређење дијагностике погонског стања трансформатора и процена расположивости, поузданости, утрошеног и преосталог животног века трансформатора на основу хемијских и електричних испитивања. У оквиру ове Студије рађени су експерименти убрзаног старења спроведени на два експериментална трансформатора инсталирана у електрани и два експериментална модел трансформатора у лабораторији.

Била је ангажована у реализацији пројекта за PUCARO Немачка, у периоду од 2017. године до 2018. године, на тему одређивања термичке стабилности папира на основу тестова старења на различитим температурама.

Као један од водећих сарадника, од 2020. године до 2023. године била је ангажована на Пројекту „Provision of Services for the Decontamination and Where Required Final Disposal of at Least 347 tons of PCB Equipment”, за Организацију UNIDO (United Nations Industrial Development Organization). У оквиру овог пројекта рађена је ПХБ деконтаминација уља и трансформатора на терену, мобилним постројењем за деконтаминацију.

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: 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“.

Драгиња Михајловић је била сарадник на 9 студија и пројеката везаних за одржавање енергетских трансформатора, за потребе Електропривреде Србије и Електромреже Србије.

Драгиња Михајловић је објавила два рада у међународном научном часопису категорије M21 (IF>5 и IF>2), два рада у међународном часопису категорије M22 (IF>2), један рад у међународном часопису категорије M23 (IF>3), аутор је пет радова објављених у научном часопису националног значаја категорије M53, коаутор је два предавања по позиву са међународног скупа, штампаних у целини категорије M31, коаутор је једног предавања по позиву са међународног скупа, штампаног у целини категорије M32, аутор је осам радова објављених у зборнику са међународних скупова штампаног у целини категорије M33 и осам саопштења на скупу националног значаја штампаних у целини категорије M63. Драгиња Михајловић је коаутор и два Нова техничка решења примењена на националном нивоу (M82) као и коаутор једног Битно побољшаног техничког решења на међународном нивоу (M83). Из области истраживања из које је предложена тема докторске дисертације до сада је објављен један рад у врхунском међународном часопису (M21), један рад у међународном часопису (M23) и један рад у научном часопису националног значаја (M53). Два рада су објављена у зборнику са међународних скупова штампан у целини (M33), и једно саопштење на скупу националног значаја штампано у целини (M63).

2. ОПИС ДИСЕРТАЦИЈЕ

2.1. Садржај дисертације

Докторска дисертација кандидата, **Драгиње П. Михајловић**, под називом *„Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора”* написана је на 131 страни од којих је 118 страна нумерисано. Садржи шест поглавља: Увод, Теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак и Литература. Дисертација укључује 34 табеле, 67 слика и 107 литературних навода. На почетку дисертације дат је Сажетак на српском и енглеском језику, а на крају су дати прилози: Листа скраћеница, Листа слика и Листа табела. Кандидаткиња је уз текст дисертације приложила и биографију са списком објављених радова, додатне изјаве прописане Правилником Универзитета о подношењу докторских дисертација на одобравање, као и Извештај о оригиналности. Написана дисертација, по форми и садржају, задовољава све стандарде Универзитета у Београду за израду докторске дисертације.

2.2. Кратак приказ појединачних поглавља

Наслов докторске дисертације јасно је формулисан и указује на садржај истраживања, док је у резимеу приказан кратак преглед остварених резултата, као и научни допринос резултата истраживања.

У **Уводу** дисертације указано је на значај енергетских трансформатора у оквиру електроенергетског система и на њихову редовну контролу и периодично одржавање како би се избегли нежељени испади трансформатора из рада, односно кварови који се у великом броју случајева могу приписати изолационом систему трансформатора.

У **Теоријском делу** описан је изолациони систем енергетског трансформатора, најважније карактеристике изолационих уља и целулозне изолације и приказани механизми деградације. Описане су синтетичке течности, полихлоровани бифенили (ПХБ), њихов састав и примена у електричној опреми, начини ширења ПХБ контаминације, начин поступања са ПХБ контаминираним уљем и опремом и преглед постојећих поступака дехлоринације уља и опреме. Указано је на важност праћења параметара који се користе у дијагностици стања енергетских трансформатора и оцени квалитета изолационог система трансформатора, уља и целулозне изолације. Приказане су постојеће методе за процену остарелости целулозне изолације као и тестови за одређивање термичке стабилности целулозне изолације.

У **Експерименталном делу** дат је опис експерименталних поступака и примењених метода испитивања у оквиру три целине: Анализа распрострањеност контаминације ПХБ у Републици Србији, одређивање кинетичких параметара реакције дехлоринације контаминираних уља са ПХБ и механизми деградације изолационог система енергетског трансформатора. Наведени су материјали и реагенси који су коришћени при извођењу експеримената и испитивањима.

У поглављу **Резултати и дискусија** дат је приказ и анализа резултата који су добијени током експерименталног рада описаног у поглављу три. Приказана је примена аутокаталитичке реакције и модела неидеалног проточног реактора за процену нивоа контаминације полихлорованим бифенилима (ПХБ) у електроенергетском систему. Предложен је кинетички модел реакције дехлоринације ПХБ у процесу базно-катализоване реакције. Кинетички параметри реакције дехлоринације су одређени коришћењем генетичког алгоритма. Изведени тестови вештачког старења су имали за циљ боље разумевање

механизама деградације изолационог система трансформатора под утицајем температуре и влаге, за различите системе изолационих течности (минерално уље, природни естар) и чврстих изолационих материјала (крафт папир, термички побољшан папир, пресборд). Концентрација метанола и етанола у уљу је квантификована новом интегрисаном аналитичком методом, помоћу TOGA GC FID, у циљу откривања кварова у целулозној изолацији.

У поглављу **Закључак** приказани су најважнији закључци изведени на основу испитивања представљених у претходним поглављима који одговарају постављеним циљевима докторске дисертације.

У поглављу **Литература** наведене су све референце цитиране у докторској дисертацији као и референце кандидата Драгиње П. Михајловић које су проистекле из ове дисертације.

3. ОЦЕНА ДИСЕРТАЦИЈЕ

3.1. Савременост и оригиналност

Докторска дисертација Драгиње П. Михајловић има актуелну и савремену тему истраживања због текуће потребе веома комплексног и сталног одржавања електро енергетског система трансформатора као и његовог утицаја на животну средину услед више деценијског кориштења ПХБ уља која су проглашена за ПОП-с једињења и регулисана су од 2004. године Штокхолмском конвенцијом.

Истраживање у оквиру ове дисертације је у функцији повећања поузданости рада, продужења животног века енергетских трансформатора и заштите животне средине.

Полихлоровани бифенили, ПХБ, су и даље веома актуелно питање, иако су забрањени пре више од 40 година, услед њиховог лаког ширења у животну средину и унакрсне контаминације на друге трансформаторе и веома штетног утицаја на људе и животну средину. Све земље које су потписнице Стокхолмске конвенције су у обавези да идентификују, обележе и уклоне из употребе опрему која садржи ПХБ до 2025. године и да направе план управљања ПХБ контаминираним опремом до 2028. године. Према доступним подацима UNEP-а из 2016. године, а не постоји новија студија, 83% од укупног броја контаминираних опрема остаје и даље за елиминацију и финално збрињавање. У Афричким земљама проценат ПХБ опреме и ПХБ контаминираних опрема је према овом извештају 98% док САД и Италија које нису ни потписнице ове конвенције нису ни решиле нити су пријавиле количине ПХБ а процењује се да је у САД произведено више од 45% ПХБ на светском нивоу.

Математички модел за предвиђање распрострањености ПХБ контаминације и кинетички модел реакције дехлоринације који су резултат ове дисертације су у директној функцији санације угрожене животне средине и ревитализације електричне опреме. Успостављање кинетичког модела за реакцију дехлоринације, на основу праћења концентрација реактаната и производа током времена, на индустријском постројењу представљају значајно унапређење до сада објављених модела ове реакције и једини кинетички модел који прати све међупроизоде. Математички модел за предвиђање распрострањености ПХБ контаминације у електро-дистрибутивном систему је једини модел који се може пронаћи у литератури. Оваква врста модела заснована на принципу аутокаталитичке реакције и модела неидеалног проточног реактора се може користити и на сличне системе ширења контаминације у животној средини.

У оквиру ове дисертације развијени математички модел омогућава процену распрострањености контаминације енергетских трансформатора у Републици Србији, применљив и на друге земље. Резултати добијени помоћу модела поређени су са резултатима

добитим на основу статистичке обраде резултата испитивања садржаја ПХБ у уљима енергетских трансформатора у Републици Србији као и на подацима за друге државе.

У оквиру ове дисертације истражени су и различити тестови старења система папирно/уљне изолације и успостављања је нове методе за утврђивање квалитета папирне изолације применом теста убрзаног старења папира до постизања краја животног века, односно вредности DP_v од 250. Нове методе за одређивање квалитета чврсте изолације и за дијагностику кварова који захватају чврсту изолацију енергетских трансформатора обезбеђују повећање поузданости рада и правовремене детекције кварова у функцији продужења животног века трансформатора.

На основу прегледа литературе може се закључити да су истраживања у оквиру ове дисертације у складу са светским истраживањима, што указује на значај и савременост проучаване проблематике. Развој нове методе за утврђивање квалитета изолационог система (уљно/целулозне изолације) трансформатора даје допринос бољем разумевању механизма деградације изолационог система трансформатора под утицајем влаге и температуре у присуству минералних или биљних уља, као и унапређење постојећих алата за процену квалитета изолационог система. Приказани резултати истраживања, израда модела контаминације енергетских трансформатора полихлорованим бифенилима, дају значајан и оригиналан допринос у циљу предвиђање степена контаминације трансформатора региона и земаља где не постоји инвентар. При томе, нарочито се има у виду да је у оквиру истраживања обрађена и квантификована и кинетика реакција дехлоринације као и оптимизације реакције дехлоринације полихлорованих бифенила у индустријским условима.

3.2. Осврт на референтну и коришћену литературу

У докторској дисертацији цитирано је 107 литературних навода, од чега је највећи број радова публикован у међународним часописима последњих година што указује на актуелност теме ове докторске дисертације у свету. У списку коришћене литературе налазе се и радови кандидаткиње који су објављени као део истраживања ове докторске дисертације, те се може закључити да кандидаткиња прати и познаје предметне области и објављене резултате у свету.

3.3. Опис и адекватност примењених научних метода

При изради дисертације примењене су следеће инструменталне технике:

- Квалитативна метода за одређивање присуства полихлорованих бифенила, у складу са методом US EPA SW- 846 9079:1996 помоћу уређаја Dextsil L2000DX Analyzer System L2000 DX.
- Квантитативна метода за одређивање присуства полихлорованих бифенила у уљу гасном хроматографијом са „electron capture“ детектором (GC-ECD) Agilent Technologies series 7890 B.
- Испитивање садржаја воде у уљу и папиру Karl Fischer колуметријском титрацијом, у складу са стандардом SRPS EN 60814:2008.
- Одређивање степена деградације папирне изолације вршено је анализом средњег вискозиметријског степена полимеризације папира помоћу капиларе, у складу са стандардом IEC 60450:2004.
- Испитивање продуката деградације папирне изолације, деривати фурана, растворених у уљу течном хроматографијом (HPLC), у складу са стандардом SRPS EN 61198:2010.
- Испитивање квалитета изолационог уља након експеримената вештачког старења вршено је у складу са стандардом IEC 60422:2013 и то 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.

- Одређивање продуката деградације изолације трансформатора, метанола и етанола (према Стандарду IEC TR 63025:2019), као и садржаја гасова растворених у уљу (према стандарду SRPS EN 60567:2013) коришћењем уређаја TOGA GC FID Agilent 7890B, методом парцијалне екстракције „headspace“.

За моделовање кинетике реакције дехлоринације коришћен је кинетички модел првог реда, 36 узастопних и упоредних кинетичких једначина које се одигравају у шаржном реактору. За одређивање 36 параметара модела коришћена је оптимизациона техника у оквиру програма МАТЛАБ. Ова техника представља комбинацију Генетског Алгоритма и функције минималног одступања.

Примењене методе адекватне су за област истраживања која је обухваћена докторском дисертацијом.

3.4. Применљивост остварених резултата

Оригинални резултати који су остварени при изради ове дисертације пружају могућност примене у функцији повећања поузданости рада, продужења животног века енергетских трансформатора и заштите животне средине.

Развијени модели (очекиване тачности +/- 20%) су намењени за процену почетних нивоа контаминације у случајевима када нису доступни комплетни инвентари, за потребе планирања одлагања или третмана контаминираних опреме.

Дефинисана реакциона шема реакције дехлоринације коју чини 30 ПХБ конгенера и кинетички модел комплексног система упоредно-узастопних реакција представљају значајно унапређење досада објављених модела ове реакције и омогућавају оптимизацију реакције у индустријским условима.

Предложена метода цикличног старења папира је адекватна за испитивање квалитета различитих изолационих папира на једноставан начин и у релативно кратком року.

Предложена интегрална метода за одређивање садржаја метанола и етанола у минералним уљима представља побољшани алат за дијагностику кварова у целулозној изолацији трансформатора, ако се користи као интегрисана анализа заједно са редовним праћењем гасова квара растворених у уљу.

Резултати добијени у истраживањима ове докторске дисертације потврђени су објављивањем једног рада у врхунским међународним часописима (M21) са импакт факторима већим од 5 и једним радом у међународном часопису (M23), и један рад у научном часопису националног значаја (M53). Два рада су објављена у зборнику са међународних скупова штампан у целини (M33), и једно саопштење на скупу националног значаја штампано у целини категорије (M63). Такође су у пријављена два рада у часописима категорије M21a која се налазе на рецензији.

3.5. Оцена достигнутих способности кандидата за самостални научни рад

На основу досадашњег рада и постигнутих резултата током докторских студија и у оквиру научно-истраживачког рада у периоду од 2010. године до данас на различитим научно-истраживачким пројектима током запослења у Електротехничком Институту Никола Тесла, као и на основу поднете докторске дисертације, Драгиња П. Михајловић, дипломирани инжењер технологије, исказала је савесност, истрајност, стручност и самосталност у претраживању научне литературе, планирању и реализацији истраживања.

Објављени радови из докторске дисертације указују на квалитет научноистраживачког рада и потврђују способност и подобност кандидаткиње. У току досадашњег рада, Драгиња П. Михајловић показала је све потребне квалитете за самостално бављење научноистраживачким радом.

4. ОСТВАРЕНИ НАУЧНИ ДОПРИНОС

4.1. Приказ остварених научних доприноса

Научни доприноси остварених резултата у оквиру ове докторске дисертације огледају се у следећем:

- Експериментално је одређена кинетичка константа аутокаталитичке реакције, добијена на основу инвентара ПХБ контаминираних опреме у индустријском систему а користи се за модел предвиђања нивоа крос-контаминације трансформатора ПХБ-ом.
- Кинетичка константа је валидирана на већим популацијама трансформатора који раде у Високо-напонским и Ниско-напонским електроенергетским системима.
- Дат је допринос бољем разумевању расподеле ПХБ контаминације код енергетских трансформатора у Републици Србији.
- Развијен је нови математички модел за процену распрострањености ПХБ контаминације у електро-енергетским системима који може бити примењен и на друге сличне системе и друге државе.
- Развијен је кинетички модел базно-катализоване реакције дехлоринације полихлорованих бифенила на основу података добијених током експерименталног рада на индустријском постројењу.
- Одређени су кинетички параметри, 36 упоредно-узастопних базно катализованих реакције дехлоринације полихлорованих бифенила у индустријском постројењу у сврху оптимизације реакције у индустријским условима.
- Развијена је нова метода за одређивање садржаја метанола и етанола и минералним изолационим уљима.
- Развијена је нова метода за утврђивање квалитета изолационог система (уљно/целулозне изолације) трансформатора.
- Дат је допринос бољем разумевању механизма деградације изолационог система трансформатора под утицајем влаге и температуре у присуству минералних или биљних уља.

4.2. Критичка анализа резултата истраживања

Истраживања у оквиру ове докторске дисертације пружила су драгоцене резултате и информације о функцији повећања поузданости рада, продужења животног века енергетских трансформатора и заштите животне средине и то дефинисањем кинетичког модела, кинетичких параметара и оптимизацијом рада поступка дехлоринације уља контаминираних ПХБ-ом, у индустријском реактору мобилног постројења Електротехничког института Никола Тесла, затим, дефинисањем математичког модела ширења ПХБ контаминације у електро-енергетским системима који може бити примењен и на друге сличне системе и друге државе, и развој нове методе за утврђивање квалитета изолационог система (уљно/целулозне изолације) трансформатора.

Развијени модели за процену ПХБ контаминације су значајни у случајевима када нису доступни комплетни инвентари, за потребе планирања одлагања или третмана контаминираних опреме.

Предложени кинетички модел реакције дехлоринације ПХБ у процесу базно-катализоване реакције и одређени кинетички параметри омогућиће оптимизацију процеса у индустријском постројењу.

Нова метода развијена у циљу утврђивање квалитета чврсте изолације на бази целулозе омогућава боље разумевање механизма деградације изолационог система трансформатора под утицајем температуре и влаге, за различите системе изолационих течности (минерелно уље, природни естар) и чврстих изолационих материјала (крафт папир, термички побољшан папир, пресборд). Нова интегрисана метода за квантификацију концентрација метанола и етанола, помоћу TOGA GC FID, омогућава свакодневно праћење стања трансформатора у циљу откривања кварова у целулозној изолацији.

4.3. Верификација научних доприноса

До данашњег дана из ове докторске дисертације проистекао је један рад у врхунском међународном часопису (M21), један рад у међународном часопису (M23) и један рад у научном часопису националног значаја (M53). Два рада су објављена у зборнику са међународних скупова штампани у целини (M33), и једно саопштење на скупу националног значаја штампано у целини (M63).

Рад у врхунском међународном часопису (M21)

1. **D.Mihajlovic**, V. Vasovic, J. Lukic, *Development of New Accelerated Aging Test for Comparison of the Quality of Different Insulating Papers Based on Cellulose, Polymers*, <https://doi.org/10.3390/polym15112556>, 2023, Vol. 15, No. 2556, (IF= 5.0, 14/86 Polymer Science) ISSN 2073-4360

Рад у међународном часопису (M23)

1. **D. Mihajlovic**, V. Ivancevic, V. Vasovic, J. Lukic, *Cellulose Degradation and Transformer Fault Detection by the Application of Integrated Analyses of Gases and Low Molecular Weight Alcohols Dissolved in Mineral Oil*, *Energies*, <https://doi.org/10.3390/en15155669>, 2022, Vol. 15, Issue 15, No. 5669, (IF= 3.333, 78/121 Energy&Fuels) ISSN 1996-1073.

Саопштења са међународног скупа, штампано у целини (M33)

1. **D. Mihajlović**, J. Janković, V. Vasović, J. Lukić, *Metode za produženje životnog veka transformatora – od dijagnostike stanja do postupaka revitalizacije*, Zbornik radova V savetovanja CG CO CIGRE, 09.– 12.05.2017, Bečići, CD Rom STK A2, RA2-04
2. **D. Mihajlovic**, V. Vasovic, J. Lukic, S. Milosavljevic, R. Todorovic, V. Ostracanin, S. Djurovic, M. Milovanovic, M. Milovanovic, T. Babić, *Improvement of Transformer Ageing Estimation and Fault Diagnostics Using Ageing Curves Derived from Experimental Twin Transformers and Quantification of Methanol as New Marker of Paper Degradation*, Proceedings of the CIGRE South East European Regional Council Conference, Vienna, Austria, 2020, Web page https://www.dropbox.com/s/tkh3cvy7ugixpj9/CIGRE-SEERC21-Proceedings-online.zip?dl=0&file_subpath=%2FTopic-1%2FCIGRE-SEERC21-Topic-1, p.1221.

Рад објављен у научном часопису (M53)

1. **D. Mihajlović**, J. Janković, V. Vasović, V. Ivančević, J. Lukić, *Primena čiste tehnologije za uklanjanje PCB iz mineralnih ulja i energetskih transformatora do postizanja veoma niskih vrednosti PCB-a za potrebe remonta i reciklaže*, Zbornik radova Elektrotehničkog instituta

Саопштење на скупу националног значаја штампан у целини (M63)

1. **D. Mihajlović, V. Vasović, K. Drakić, N. Kovačević, J. Radomirović, J. Lukić, Nova mineralna i biljna izolaciona ulja i pravila mešanja**, zbornik radova sa konferencije CIRED Srbija, 2014, CD rom STK 3, R-3.07.

5. ЗАКЉУЧАК И ПРЕДЛОГ

На основу свега наведеног, Комисија сматра да докторска дисертација кандидата **Драгиње П. Михајловић**, дипломираног инжењера технологије, под називом **„Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора”** представља значајан и оригиналан научни допринос са практичном применом, што је и потврђено објављивањем једног рада у врхунском међународном часопису и једног рада у међународном часопису, као и саопштењима на међународним скуповима. Предмет и циљеви који су постављени јасно су наведени и у потпуности остварени. Комисија је мишљења да ова докторска дисертација испуњава све захтеване критеријуме, као и да је кандидаткиња током израде дисертације показала научноистраживачку способност у свим фазама израде 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 прихвати овај реферат, да се докторска дисертација под називом **„Контаминација полихлорованим бифенилима и хемијски процеси деградације изолационог система енергетских трансформатора”** изложи на увид јавности и Реферат упути на коначно усвајање Већу научних области техничких наука Универзитета у Београду, у складу са законским одредбама Универзитета.

Београд, 04.06.2024. године

ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....
др **Сандра Глишић**, доцент
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
др **Марко Стаменић**, доцент
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

.....
др **Јелена Лукић**, виши научни сарадник
Електротехничког института Никола Тесла акционарско друштво Београд