

**Образац 3.**

**Факултет**      ТЕХНОЛОШКО-  
МЕТАЛУШКИ

---

**УНИВЕРЗИТЕТ У БЕОГРАДУ**

35/412

Веће научних области техничких наука

\_\_\_\_\_  
(Број захтева)

\_\_\_\_\_  
(Назив већа научне области коме се захтев  
упућује)

10.01.2020. године

\_\_\_\_\_  
(Датум)

## **ЗАХТЕВ**

**за давање сагласности на одлуку о прихватању теме докторске дисертације  
и о одређивању ментора**

Молимо да, сходно члану 47. ст. 5. тач. 3. Статута Универзитета у Београду ("Гласник Универзитета", број 186/15-пречишћени текст и 189/16), дате сагласност на одлуку о прихватању теме докторске дисертације:

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

\_\_\_\_\_  
(пун назив предложене теме докторске дисертације)

НАУЧНА ОБЛАСТ

Технолошко инжењерство

---

ПОДАЦИ О КАНДИДАТУ:

1. Име, име једног од родитеља и презиме кандидата:

Валентина (Здравко) Васовић

---

2. Претходно образовање (назив и седиште факултета, студијски програм):

Технолошко-металуршки факултет

Универзитет у Београду,

---

3. Година завршетка  
претходног нивоа студија: 2008.

4. Година уписа на докторске студије: Поновни упис на ДАС у другу годину 2017.
- 

5. Назив студијског програма  
докторских студија:

Хемијско инжењерство

---

## ПОДАЦИ О МЕНТОРУ:

Име и презиме ментора: Александар Орловић

Звање: редовни професор

Списак радова који квалификују ментора за вођење докторске дисертације:

1. Lukić, J.M., Nikolić, D., Mandić, V., Glisić, S.B., Antonović, D., Orlović, A.M., Removal of sulfur compounds from mineral insulating oils by extractive refining with N-methyl-2-pyrrolidone, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 51 (2012) 4472-4477. (DOI: 10.1021/ie300450e), IF=2.206, (Engineering, Chemical 30/133) ISSN: 0888-5885
2. Ivana M. Mijatović, Sandra B. Glisic, Aleksandar M. Orlović, "Modeling of catalytic reactor for hydrotreating of straight-run gas oil blended with FCC naphtha and light cycle oil: The influence of vapor-liquid equilibrium", *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 2014, 53 (49), pp 19104–19116. (DOI: 10.1021/ie503188p), IF=2.547 (Engineering, Chemical 33/133) ISSN: 0888-5885
3. Z. Đukanović, S.B. Glišić, V. Jančić Čobanin, M. Nićiforović, C.A. Georgiou, A.M. Orlović, Hydrotreating of straight-run gas oil blended with FCC naphtha and light cycle oil, *Fuel Processing Technology*, 106 (2013) 160-165. (DOI: 10.1016/j.fuproc.2012.07.018), IF=3.019 (Engineering Chemical 18/133) ISSN: 0378-3820
4. Abdualnaser Muftah Almagrbi, Sandra B. Glisic, Aleksandar M. Orlovic, "The phase equilibrium of triglycerides and ethanol at high pressure and temperature: The influence on kinetics of ethanolysis", *The Journal of Supercritical Fluids*, 61 (2012) 2-8. (<http://dx.doi.org/10.1016/j.supflu.2011.10.002>), IF=2.732 (Engineering Chemical 19/133) ISSN: 0896-8446
5. Lukic, J.M., Milosavljevic, S.B., Orlovic, A.M., Degradation of the insulating system of power transformers by copper sulfide deposition: Influence of oil oxidation and presence of metal passivator, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 49 (2010) 9600-9608. (DOI: 10.1021/ie1013458), IF=2.072 (Engineering Chemical 29/135) ISSN: 0888-5885.

Обавештавамо вас да је      Наставно-научно веће

---

(назив надлежног тела факултета)

на седници одржаној    24.12.2019. године    размотрило предложену тему и закључило да је  
тема подобна за израду докторске дисертације јер садржи оригиналну идеју и да је од  
значаја за развој науке, примену њених резултата, односно развој научне мисли уопште.

**ДЕКАН ФАКУЛТЕТА**

---

Проф Др Петар Ускоковић

- Прилог    1.    Одлука Наставно-научног већа о прихватању теме и одређивању ментора
2.    Извештај Комисије о оцени научне заснованости теме докторске дисертације

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

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. 43. Правилника о докторским студијама ТМФ-а на седници Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета од 24.12.2019. године, донета је

### О Д Л У К А

о прихватању Реферата Комисије за оцену подобности теме и кандидата  
за израду докторске дисертације

Прихвата се Реферат Комисије за оцену подобности теме и кандидата и одобрава израда докторске дисертације **Валентине Васовић**, број индекса 4041/2017, под називом: **„Расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима“**.

Одлуку о давању сагласности на предлог теме докторске дисертације доноси Универзитет у Београду.

За ментора се одређује др Александар Орловић, редовни професор Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет, уз сагласност Комисије за докторске студије.

Одлуку доставити: Универзитету у Београду, кандидату, ментору, Служби за наставно студентске послове и архиви Факултета.

Д Е К А Н

Проф. др Петар Ускоковић

## **НАСТАВНО-НАУЧНОМ ВЕЋУ**

**Предмет:** Подобност теме и кандидата Валентине Васовић, дипл. инж. технологије за израду докторске дисертације

Одлуком Наставно-научног већа Технолошко-металуршког факултета бр. 35/341 од 31.10.2019. године, именовани смо за чланове Комисије за оцену подобности теме и кандидата ВАЛЕНТИНЕ ВАСОВИЋ за израду докторске дисертације и научне заснованости теме „РАСПОДЕЛА ВЛАГЕ И ДЕГРАДАЦИЈА ИЗОЛАЦИОНОГ СИСТЕМА ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА СА МИНЕРАЛНИМ И БИЉНИМ УЉИМА”

На основу материјала приложеног уз Захтев кандидата, Комисија подноси следећи

## **РЕФЕРАТ**

### **1. Подаци о кандидату**

#### 1.1. Биографски подаци

Валентина Васовић рођена је 21.11.1983. године у Београду, где је завршила основну школу и XIII београдску гимназију. На Технолошко-металуршки факултет уписала се школске 2002/2003. године, на одсек 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 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.

#### 1.2. Сечено научноистраживачко искуство

У оквиру докторских студија положила је 10 испита предвиђених студијским програмом са просечном оценом 9,4 и школске 2018/2019. године одбранила Завршни испит под називом „Расподела влаге у изолационом систему енергетских трансформатора и утицај присуства влаге на брзину деградације изолационог папира у систему са минералним и биљним

изолационим уљем“ са оценом 10, пред комисијом у саставу др. Александар Орловић, др. Сандра Глишић и др. Марко Стаменић.

Табела 1.2.1 Списак положених испита, остварени ЕСПБ бодови и оцене на докторским студијама

| Назив испита                                                 | ЕСПБ поени | Оцена       |
|--------------------------------------------------------------|------------|-------------|
| 1. Аналогије феномена преноса                                | 5          | 8           |
| 2. Виши курс термодинамике                                   | 5          | 10          |
| 3. Хемијска кинетика                                         | 5          | 8           |
| 4. Математичка обрада експерименталних података              | 5          | 8           |
| 5. Анализа рада и пројектовање вишефазних хемијских реактора | 5          | 10          |
| 6. Одабрана поглавља инструменталне анализе                  | 7          | 10          |
| 7. Масена спектрометрија                                     | 4          | 10          |
| 8. Структурна анализа органских молекула                     | 6          | 10          |
| 9. Хетерогена катализа                                       | 4          | 10          |
| 10. Отпадни органски производи као секундарне сировине       | 5          | 10          |
| 11. Завршни испит                                            | 30         | 10          |
| <b>Укупно</b>                                                | <b>81</b>  | <b>9,45</b> |

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 (Areva T&D). У оквиру овог пројекта била је ангажована на испитивању физичких, хемијских и електричних својстава природних естара, пре и након експерименталног 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.

Валентина Васовић је коаутор четири рада објављена у часописима међународног значаја (M21-1 рад и M22-3 рада), једног рада објављеног у часопису националног значаја (M53-1), као и 22 саопштења на научним скуповима (M31-2, M32-2, M33-7, M63-13).

### 1.3 Списак објављених научних радова и саопштења

#### Радови објављени у часописима међународног значаја(M20)

- Рад у врхунском међународном часопису (M21)

1. Jelena M. Lukić, Draganja Nikolić, **Valentina Mandić**, Sandra Glišić, Dušan Antonović, Aleksandar Orlović, Removal of Sulfur Compounds from Mineral Insulating Oils by Extractive Refining with N-methyl-2-pyrrolidone, Industrial and Engineering Chemistry

Research. 51 (2012) 4472-4477. DOI:10.1021, ISSN 0888-5885; **IF=2.21 (2012)**. Engineering, Chemical (30/133).

- Рад у истакнутом међународном часопису (M22)

1. **V.Vasović**, J.Lukić, C.Perrier, M.Coulibally, Equilibrium Charts for Moisture in Paper and Pressboard Insulations in Mineral and Natural Ester Transformer Oils, IEEE Electrical Insulation Magazine, 30 (2) (2014) 10-16. DOI:10.1109, ISSN 0883-7554, **IF= 1.36 (2014)**. Engineering, Electrical & Electronic (98/243).
2. V.Vasovic, Jelena Lukic, Draginja Mihajlovic, Brank Pejovic, Uros Radoman, Zoran Radakovic, Aleksandar Orlovic, Aging of Transformer Insulation - Experimental Transformers and Laboratory Models with different Moisture Contents: Part I – DP and Furans Aging Profiles, accepted for publication, IEEE Transaction on Dielectrics, December 2019, **IF= 2.135 (2018)**. Engineering, Electrical & Electronic (134/265).
3. V.Vasovic, Jelena Lukic, Draginja Mihajlovic, Brank Pejovic, Milovan Milovanovic, Uros Radoman, Zoran Radakovic, Aging of Transformer Insulation - Experimental Transformers and Laboratory Models with different Moisture Contents: Part II – Moisture Distribution and Aging Kinetics accepted for publication, IEEE Transaction on Dielectrics, December 2019, **IF= 2.135 (2018)**. Engineering, Electrical & Electronic (134/265).

Зборници међународних научних скупова(M30)

- Предавање по позиву са међународног скупа, штампао у целини (M31)

1. J.Lukić, D.Nikolić, **V.Mandić**, K.Drakić, S.Milosavljević, A.Orlović, Phenomenon of Copper Sulphide Deposit in the Paper: influential factors, precursors and metal passivators, TechCon Asia Pacific, Proceedings, page 67-78, April 2012,.
2. J.Lukić, D.Mihajlović, **V.Vasović**, J.Janković, K.Drakić, S.Milosavljević, Mitigation Techniques on Corrosive Sulphur, Tech Con Asia Pacific, Proceedings page 01-12, April 2014.

- Предавање по позиву са међународног скупа, штампао у изводу (M32)

1. J.Lukić, D.Nikolić, V.Mandić, K.Drakić, S.Milosavljević, A.Orlović, Copper Sulphide Deposition in the Paper: Influence of Oxygen, Inhibitors and Paper Absorbed Metal Passivator, Session 3 – Insulating Materials, Track 1 – Asset and Maintenance Management, Invited Presentation D-2, EuroDoble Colloquium, Manchester, October 15-17, 2012.
2. J.Lukic, D.Mihajlović, **V.Vasovic**, J.Jankovic, K.Drakić, S.Milosavljević "Corrosive Sulphur Risk Assessment and Mitigation Techniques", 18th IEEE International Conference on Dielectric Liquids, Invited Lecture, Program, page 54, June 29th to July 3, 2014, Bled, Slovenia

- Саопштења са међународног скупа, штампано у целини(M33)

1. J.Lukić, D.Nikolić, **V.Mandić**, K.Drakić, S.Milosavljević, A.Orlović, „Removal of PCB contaminated Oils“, 7.Savetovanje MAKO CIGRE, CD rom zbornik radova, A2-102R-EN, Ohrid, 2-4 Oktobar 2011.
2. J.M. Lukić, D.P.Mihajlović, J.U. Janković, **V. Mandić**, Recent Findings Related to Copper Sulphide Formation Mechanism and Mitigation Techniques, CIGRE A2/C4 Colloquium, CD rom, PS 3\_ id097, Zurich, Sept. 2013.

3. C. Perrier, M-L. Coulibaly, France J. Lukic, **V. Vasović**, Serbia, "Ageing phenomena of cellulose/oil insulation in natural ester and mineral oil", 45th CIGRE Session, CD rom, SC A2, A2 – 302, Paris, 2014, [www.cigre.com](http://www.cigre.com)
4. **V. Vasović**, D. Mihajlović, J. Lukic, Experiences in transformer diagnostics derived from oil analysis, Conference of experts "Isoliersysteme in der Hochspannungstechnik", [http://www.vum.co.at/aktuelles/artikel~a-25--6\\_Fachtagung\\_Isoliersysteme\\_in\\_der](http://www.vum.co.at/aktuelles/artikel~a-25--6_Fachtagung_Isoliersysteme_in_der), July 2017, Graz, Austria
5. J. Janković, D. Mihajlović, **V. Vasović**, N. Kovačević, J. Radomirović, J. Lukić, „Rezultati PCB dekontaminacije transformatora u JP Elektroprivreda Srbije i PD Elektrovojvodina primenom patentirane tehnologije dehlorinacije ulja“, 3. savetovanje “Opasan industrijski otpad i tretman industrijskih otpadnih voda“, str. 52-58, maj 2017, Palić
6. J. Lukić, **V. Vasović**, D. Mihajlović, J. Janković, N. Kovačević, V. Ivančević, S. Milosavljević, „PCB dekontaminacija energetskih transformatora i trajno rešavanje problema korozivnog sumpora primenom patentirane tehnologije dehlorinacije i desulfurizacije ulja“, V savetovanje, CG CO CIGRE, CD rom zbornik radova, STK A2, R A2-02, maj 2017, Bečići
7. D. Mihajlović, J. Janković, **V. Vasović**, J. Lukić „Metode za produženje životnog veka transformatora – od dijagnostike stanja do postupaka revitalizacije“, V savetovanje, CG CO CIGRE, CD rom zbornik radova, STK A2, R A2-04, maj 2017, Bečići

#### Часописи националног значаја(M50)

##### - Рад објављен у научном часопису(M53)

1. J. Janković, D. Mihajlović, N. Kovačević, **V. Vasović**, J. Lukić: „Primena patentirane tehnologije za rešavanje problema PCB kontaminacije i korozivnog sumpora u energetskim transformatorima“, UDK:621.315.615:620.193.4:621.314.212 , BIBLID:0350-8528(2018),28,p.41-50, doi:10.5937/zeint28-19592

#### Зборници скупова националног значаја(M60)

##### - Саопштење на скупу националног значаја штампан у целини(M63)

1. J. Lukić, D. Nikolić, **V. Mandić**, S. Milosavljević, A. Orlović: Dekontaminacija PCB kontaminiranih transformatora, 30-ta konferencija CIGRE SRBIJE, Zlatibor, Srbija, maj 2011, cd rom zbornik radova, STK A2, R A2-01, <http://www.cigresrbija.rs>
2. **V. Mandić**, D. Nikolić, J. Lukić: Izolaciona ulja biljnog porekla i komparativna analiza sa mineralnim uljima, 30-ta konferencija CIGRE SRBIJE, cd rom zbornik radova STK A2, R A2-02, Zlatibor, Srbija, maj 2011, <http://www.cigresrbija.rs>
3. K. Drakić, M. Pajić, **V. Mandić**, J. Lukić: Starenje transformatorskog ulja i oksidacioni indeks: pregled stanja transformatora u Srbiji, 8. Savetovanje CIRED SRBIJE, cd rom zbornik radova, STK 3, R3.01 Vrnjačka Banja, septembar 2012, <http://www.ciredserbia.org.rs>
4. J. Lukić, **V. Mandić**, D. Mihajlović, S. Milosavljević, P. Vasić: Post mortem analiza i procena životnog veka blok transformatora na bloku 2 TENT B, CIGRE Srbije, CD rom zbornik radova STK A2, R A2-13, Zlatibor, maj 2013, <http://www.cigresrbija.rs>
5. D. Mihajlović, **V. Vasović**, K. Drakić, N. Kovačević, J. Radomirović, J. Lukić, "Nova mineralna i biljna izolaciona ulja i pravila mešanja", CIRED Srbija, cd rom zbornik radova, STK 3, R3-07, Vrnjačka Banja, septembar 2014, <http://ciredserbia.org.rs>
6. K. Drakić, D. Mihajlović, **V. Vasović**, J. Janković, J. Lukić, "Principi dijagnostike i tumačenje rezultata gasnohromatografske analize- slučajevi iz prakse", CIRED Srbije, cd rom zbornik radova, STK 3, R3-08, Vrnjačka Banja, septembar 2014, <http://ciredserbia.org.rs>.

7. Jelena Ponoćko, Jelena Lazić, Denis Ilić, Vesna Radin, **V. Vasović**, Jelena Lukić, Srđan Milosavljević, Aleksandar Janjić, "Indeks zdravlja kao deo upravljanja resursima u oblasti energetskih transformatora", CIGRE Srbija, cd rom zbornik radova, STK A2, R A2-07, Zlatibor, Maj 2015, <http://www.cigresrbija.rs>
8. **V. Vasović**, D. Mihajlović, J. Janković, K. Drakić, J. Lukić, "Analiza sadržaja gasova rastvorenih u ulju – značaj u dijagnostici pogonskog stanja transformatora", CIRED Srbije, cd rom zbornik radova, STK 1, R1.13, Vrnjačka Banja, septembar 2016, <http://ciredserbia.org.rs>
9. J. Janković, K. Drakić, **V. Vasović**, J. Lukić, J. Planojević, Đ. Janačković, Đ. Veljović, „Regeneracija ostarelih transformatorskih ulja domaćim sorbentima u cilju produženja životnog veka transformatora“, CIRED Srbije, cd rom zbornik radova, STK 1, R1.25, Vrnjačka Banja, septembar 2016, <http://ciredserbia.org.rs>
10. D. Ilić, J. Lazić, **V. Vasović**, B. Pejović, Đ. Jovanović, J. Lukić, S. Milosavljević, „Indeksiranje stanja energetskih transformatora kao alat upravljanja resursima“, CIRED Srbije, cd rom zbornik radova, STK 1, R1.09, Vrnjačka Banja, septembar 2016, <http://ciredserbia.org.rs>
11. **V. Vasović**, D. Mihajlović, J. Janković, J. Lukić, "Dijagnostika stanja energetskih transformatora na osnovu analize ulja – značaj baze podataka i iskustva iz prakse", CIGRE Srbije, STK A2, A 2-12, Zlatibor, 2017, <http://www.cigresrbija.rs>
12. J. Janković, J. Lukić, **V. Vasović**, J. Planojević, B. Pejović, V. Ostraćanin, R. Todorović, „Unapređenje dijagnostike stanja energetskih transformatora uvođenjem novih ispitnih metoda i problemi eksploatacije transformatora sa uljem koje sadrži korozivni sumpor“, 34. savetovanje CIGRE Srbija, cd rom zbornik radova, STK A2, R A2-06, Vrnjačka Banja, Jun 2019, <http://www.cigresrbija.rs>
13. **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“, 34. savetovanje CIGRE Srbija, cd rom zbornik radova, STK A2, R A2-07, Jun 2019, Vrnjačka Banja, <http://www.cigresrbija.rs>

### 1.3. Оценка подобности кандидата за рад на предложеној теми

На основу досадашњег рада и показаних резултата током докторских студија, у оквиру научно-истраживачког рада на пројектима Министарства за науку и технолошки развој Републике Србије, III 45019 и TP 33024 и других пројеката на којима је била ангажована као сарадник института Никола Тесла, Валентина Васовић, дипл. инж. технологије, показала је изразиту склоност и способност за бављење научно-истраживачким радом као и неопходну самосталност у експерименталном раду, обради резултата и публикацији радова. Такође, из саме предложене теме дисертације, кандидат је до сада објавио три рада у истакнутим међународном часопису M22.

На основу свега наведеног, Комисија сматра да кандидат испуњава услове за рад на предложеној теми докторске дисертације.

## **2. Предмет и циљ истраживања**

Предмет истраживања ове докторске дисертације је расподела влаге и деградација изолационог система енергетских трансформатора изолованих крафт папиром и изолационим уљем минералног, односно биљног порекла. Циљ научног истраживања је унапређење методе за индиректно утврђивање овлажености изолационог система енергетских трансформатора, детаљнија анализа деградације изолационог система енергетских трансформатора под утицајем влаге и температуре, као и унапређење постојећих алата за процену остарелости реалних трансформатора.

Енергетски трансформатори су електрични уређаји који имају функцију да трансформишу напон и снагу и представљају важну компоненту у производњи и дистрибуцији електричне енергије до крајњих корисника. За исправан рад енергетских трансформатора веома је важно стање изолационог система уље-папир. Изолациони систем енергетских трансформатора чини чврста изолација на бази целулозе (папир, пресборд, утифол, дрво...) и изолациона течност која служи да изолиује делове под напоном и да одводи топлоту. Као изолационе течности у најширој употреби за сада су уља минералног порекла. Новији и све ригорознији еколошки захтеви које изолационе течности морају да испуне да би се примениле у трансформаторима, везани су пре свега за биоразградивост и обновљивост ресурса, као и за проблем свођења опасности од пожара услед хаварија трансформатора на минимум. Биљна уља (естри виших масних киселина и глицерола) у потпуности испуњавају ове захтеве, па је заинтересованост за њихову примену у електричној опреми последњих 20-ак година нагло порасла [1].

У папирно-уљном изолационом систему енергетских трансформатора вода је расподељена између папира и уља, при чему се највећи део воде налази у папирној изолацији. Вода у целулозној изолацији утиче на снижавање диелектричне чврстоће материјала и доводи до убрзане деградације папирне изолације и скраћења животног века трансформатора [2,3]. С тим у вези, с аспекта одржавања трансформатора и продужења животног века, од велике је важности прецизна процена садржаја воде у целулози.

Процена овлажености изолационог система трансформатора се може вршити електричним методама или мерењем садржаја воде у уљу уз примену равнотежних дијаграма. Метода која подразумева примену равнотежних дијаграма је далеко бржа, јефтинија и једноставнија од електричних метода, али тачност методе, између осталог, веома зависи од начина на који су дијаграми израђени, као и од материјала који су притом коришћени. У литератури се налази велики број равнотежних кривих, пре свега за минерална изолациона уља. Начин на који су криве формиране значајно се разликује од аутора до аутора. Већина је базирана на мерењу садржаја воде у уљу и садржаја воде у ваздуху у равнотежним условима, а затим је садржај воде у папиру процењиван на основу равнотежних дијаграма папир-ваздух [2,3]. С друге стране, на тачност процене садржаја воде применом равнотежних дијаграма код реалних трансформатора, значајно утиче врста материјала, као и масени односи који су коришћени током израде, што за многе дијаграме није назначено.

Као параметар остарелости папирне изолације енергетских трансформатора најчешће се узима средњи вискозиметријски степен полимеризације папира. Стање уљне изолације трансформатора у погону може се утврдити узорковањем и испитивањем примених особина уља у лабораторији, док се папирна изолација око бакарних проводника не може узорковати све док трансформатор не заврши свој радни век. Процена стања папирне изолације трансформатора у погону изводи се анализом продуката деградације папирне изолације који се растварају у уљу. Као метода за процену деградације чврсте изолације до сада је најширу примену нашло испитивање садржаја деривата фурана у уљу. Истраживања су показала да концентрација деривата фурана растворених у уљу у великој мери зависи од остарелости папирне изолације трансформатора, али и од овлажености изолационог система и остарелости самог уља, односно садржаја киселина у уљу [4,5,6]. Тренутно у литератури постоји неколико корелација које повезују садржај деривата фурана у уљу и остарелост папирне изолације, али су ове корелације већином формиране на основу резултата лабораторијских експеримената који не уважавају утицај воде на деградацију целулозне изолације и расподелу деривата фурана између уља и папира [4,5,6].

Други део истраживања у оквиру ове дисертације представљаће детаљније испитивање утицаја овлажености изолационог система и температуре на деградацију папирне изолације енергетских трансформатора. Да би се омогућило експериментално праћење ових феномена биће израђена два експериментална трансформатора специфичне конструкције код којих ће бити омогућено периодично узорковање папирне и уљне изолације ради хемијских

испитивања. Експериментални трансформатори ће бити подвргнути вештачком старењу на повишеној температури од 105 °С, све док папирна изолација не достигне ниске вредности степена полимеризације папира (200-250) што се сматра крајем животног века трансформатора. На основу добијених резултата, биће израђене криве зависности степена полимеризације папира од садржаја деривата фурана растворених у уљу. Ове криве ће моћи да се користе за процену остарелости папирне изолације реалних трансформатора у погону, мерењем садржаја деривата фурана у уљу.

У циљу утврђивања у којој мери се феномени деградације изолационог система реалних трансформатора могу сагледати у једноставнијим и јефтинијим експериментима изведеним у лабораторијским условима, упоредо са старењем реалних трансформатора, биће спроведен експеримент старења изолационог система у лабораторијским условима, са истим материјалима и у истим масеним односима као и код експерименталних трансформатора.

### **Литература**

- [1] CIGRE Technical Brochure,“: „Experience in Service with New Insulating Liquids“, no.436, 2010.
- [2] CIGRE Technical Brochure,“Moisture Equilibrium and Moisture Migration within Transformer Insulation Systems,” no. 349, 2008.
- [3] CIGRE Technical Brochure, “Moisture measurement and assessment in transformer insulation – Evaluation of chemical methods and moisture capacitive sensors,” no. 741, 2018.
- [4] CIGRE Technical Brochure, “Aging of solid insulation,” no.323, 2007
- [5] CIGRE Technical Brochure, “Furanic compounds for diagnosis,” no. 494, 2012.
- [6] CIGRE Technical Brochure, “Aging of liquid impregnated cellulose for power transformers,” no. 738, 2018.

### **3. Полазне хипотезе**

Прегледом литературе је установљено да се одржавање енергетских трансформатора пуњених уљем, у великој мери ослања на хемију изолационих уља. Потребе за што прецизнијом проценом стања енергетских трансформатора у циљу оцене њихове поузданости и планирања инвестиција су увек веома актуелне, што потврђују активности радних група у оквиру светске организације CIGRE (удружење великих електричних мрежа) кроз публикување техничких брошура из ове области.

Процена стања енергетских трансформатора и преосталог животног века трансформатора у највећој мери обухвата стање папирне изолације, будући да је изолационо уље релативно лако регенерисати или заменити.

У оквиру истраживања обухваћених овом дисертацијом користиће се полазне хипотезе да је стање целокупног изолационог система зависно од врсте и типа изолационог уља као и од нивоа температура којима су изложени намотаји, да је ниво присуства влаге у намотајима значајан фактор губитка својстава изолационог система и да је на основу резултата добијених на лабораторијском и модел нивоу могуће развити корелације за процену садржаја влаге као и процену деградације изолационог система енергетских трансформатора.

Сазнања до којих се до данас дошло, углавном су настала из резултата лабораторијских експеримента уз верификују на реалним трансформаторима који су завршили свој радни век и за које постоје потребни резултати испитивања. Претпоставља се да су разлике између реалних система и оних у лабораторијским условима, између осталог, последица неуниформне расподеле температуре и влаге, било по висини намотаја или по дебљини целулозних материјала различите структуре.

Симулација изолационих система енергетских трансформатора у лабораторијским условима коришћењем две врсте целулозних материјала, омогућиће истраживање феномена расподеле

влаге између целулозних материјала различите дебљине. С обзиром да се код реалних трансформатора влага расподељује између изолационог уља и целулозних материјала различите дебљине, као што су: папир, пресборд, дрво, а да се процена овлажености папирне изолације врши на основу укупног садржаја воде уљу, равнотежни дијаграми добијени коришћењем папира и пресборда, требало би да дају тачнију процену садржаја влаге у папирној изолацији реалних трансформатора.

Процена остарелости папирне изолације код трансформатора у употреби базира се на укупном садржају деривата фурана у уљу, при чему код реалних трансформатора старење папира често није униформно по висини намотаја. Убрзано старење реалних трансформатора уз могућност периодичног узорковања и испитивања папирне изолације, за два различита садржаја воде, омогућиће боље разумевање механизма деградације изолационог система реалних енергетских трансформатора, као и успостављање корелација између укупног садржаја деривата фурана, као и најниже, односне укупне средње вредности степена полимеризације папирне изолације. Ове корелације требало би да омогуће тачнију процену остарелости папирне изолације енергетских трансформатора у погону.

#### **4. Научне методе истраживања**

Методе које ће се користити у оквиру истраживања при изради ове докторске дисертације биће експерименталне и теоретске.

Експерименталне методе истраживања обухватиће експериментално утврђивање равнотежних садржаја влаге у изолационом уљу и папиру на 7 различитих температура за 5 садржаја влаге, као и 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.

Експериментална мерења биће изведена у лабораторији за испитивање изолационих уља и папира Електротехничког института Никола Тесла. Испитивање садржаја воде у уљу и папиру биће изведено аналитичком техником Karl Fischer колуметријске титрације, у складу са стандардом SRPS EN 60814:2008. Утврђивање степена деградације папирне изолације вршиће се 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) вршиће се техником течне хроматографије (HPLC), у складу са стандардом SRPS EN 61198:2010. У циљу оцене квалитета изолационог уља након експеримента вештачког старења биће испитане следеће применске особине у складу са стандардом IEC 60422:2013: диелектрична чврстоћа уља, фактор диелектричних губитака и специфична електрична отпорност уља, садржај киселих продуката старења у уљу и међуповршински напон уље-вода. Обрада резултата мерења биће вршена у програму Microsoft Office 2010, Microsoft Excel.

Равнотежни дијаграми формирану у оквиру ове докторске дисертације биће проверени поређењем резултата примене ових дијаграма на реалним енергетским трансформаторима са резултатима добијеним применом електричних метода на истим трансформаторима, као и резултатима добијеним применом равнотежних дијаграма који већ постоје у литератури.

Корелације између садржаја деривата фурана и степена полимеризације папира биће проверене за одређен број трансформатора који су завршили свој радни век, а за које постоје потребни подаци.

## 5. Очекивани научни допринос

Резултати ове докторске дисертације ће допринети:

- бољем разумевању феномена расподеле влаге између целулозних материјала различите дебљине у изолационом систему енергетских трансформатора са минералним и биљним уљима,
- тачнијој процени садржаја влаге у изолационом папиру реалних енергетских трансформатора у погону,
- бољем разумевању механизма деградације изолационог система трансформатора под утицајем влаге и температуре, и то у присуству минералних или биљних уља,
- бољем разумевању разлика у механизмима деградације изолационог система реалног трансформатора и лабораторијских модела под утицајем влаге и температуре,
- унапређењу постојећих алата за процену остарелости реалних трансформатора у погону, њихове поузданости и расположивости, као и
- омогућавање бољег планирања инвестиција тачнијом проценом преосталог животног века енергетских трансформатора.

## 6. План истраживања и структура рада

Очекује се да ће докторска дисертација имати следећа поглавља: *Увод, теоријски део, Експериментални део, Резултати и дискусија, Закључак, Литература*.

У поглављу *Увод*, биће дефинисани главни циљеви дисертације, предмет истраживања и допринос дисертације.

У оквиру *Теоријски део* докторске дисертације биће описане методе које се користе у дијагностици стања енергетских трансформатора пуњених уљем. Такође, биће дат преглед постојећих дијаграма равнотежне расподеле влаге у систему папир уље, као и преглед постојећих корелација деривати фурана-степен полимеризације папира.

У *Експерименталном делу* биће наведено следеће:

- Опис експеримента на основу којих ће бити формиран дијаграми равнотежне расподеле влаге у систему папир-уље;
- Услови који се морају постићи како би били сигурни да је равнотежа успостављена;
- Опис експеримента у оквиру којих ће бити испитивани механизми деградације изолационог система енергетских трансформатора и на основу којих ће бити формиране корелације деривати фурана-степен полимеризације папира;
- Опис конструкције експерименталних трансформатора;
- Опис метода и апаратуре за утврђивање остарелости изолационих уља и папира;
- Материјали, као и њихови масени односи, који ће бити коришћени у експериментима;

У поглављу *Резултати и дискусија* биће приказани сви резултати мерења као и њихова дискусија. Ово поглавље ће садржати:

- дијаграме равнотежне расподеле садржаја воде у систему уље-папир за минерално и за биљно уље формиране на основу добијених резултата
- поређење резултата процене овлажености изолације код реалних трансформатора применом дијаграма формираних у оквиру ове дисертације и резултата добијених електричним методама,
- поређење резултата процене овлажености изолације код реалних трансформатора применом дијаграма формираних у оквиру ове дисертације и дијаграма који већ постоје у литератури.

- резултате вештачког старења изолационог система реалних трансформатора и лабораторијских модела под утицајем температуре од 105 °C и садржаја влаге у папиру од око 1 % и око 4%
- поређење феномена деградације изолационих система реалних трансформатора и лабораторијских модела.

На основу извршених експерименталних мерења, у поглављу *Закључак* биће сумирани сви добијени резултати, на основу којих ће бити изведени закључци.

Сви цитирани наводи, као и радови који су настали у току истраживања и рада на овој докторској дисертацији, налазиће се у поглављу *Литература*.

## 7. Закључак и предлог

На основу изнетих података, Комисија сматра да је тема предложене докторске дисертације кандидата ВАЛЕНТИНЕ ВАСОВИЋ под насловом „РАСПОДЕЛА ВЛАГЕ И ДЕГРАДАЦИЈА ИЗОЛАЦИОНОГ СИСТЕМА ЕНЕРГЕТСКИХ ТРАНСФОРМАТОРА СА МИНЕРАЛНИМ И БИЉНИМ УЉИМА“ научно заснована и предлаже наставно-научном већу Технолошко-металуршког факултета да је прихвати. За ментора ове дисертације предлаже се др Александар Орловић, редовни професор Технолошко-металуршког факултета Универзитета у Београду. Истраживања у оквиру ове дисертације припадају научној области Хемијско инжењерство, за коју је Технолошко-металуршки факултет Универзитета у Београду матична установа.

У Београду, 10.12.2019.

## ЧЛАНОВИ КОМИСИЈЕ

.....  
Др Александар Орловић, редовни професор  
Универзитета у Београду, Технолошко-металуршки факултет

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

.....  
Др Јелена Лукић, Научни сарадник  
Електротехнички институт Никола Тесла