

**NASTAVNO-NAUČNOM VEĆU
TEHNOLOŠKO-METALURŠKOG FAKULTETA
UNIVERZITETA U BEOGRADU**

Na sednici Nastavno-naučnog veća Tehnološko-metalurškog fakulteta održanoj 20.10.2011. godine određeni smo za članove Komisije za ocenu naučne zasnovanosti teme doktorske disertacije Mr Jelene Lukić diplomiranog inženjera tehnologije, pod naslovom:

**PROCESI DEGRADACIJE PAPIRNO-ULJNE IZOLACIJE ENERGETSKIH
TRANSFORMATORA I RAFINACIJA DEGRADIRANIH MINERALNIH
IZOLACIONIH ULJA EKSTRAKCIJOM TEČNO-TEČNO SA N-METIL-2-
PIROLIDONOM**

O predloženoj temi i njenoj naučnoj zasnovanosti Komisija podnosi sledeći

IZVEŠTAJ

BIOGRAFSKI PODACI O KANDIDATU

Mr Jelena Lukić je rođena u Beogradu 1970 godine. Diplomirala je na Tehnološko-metalurškom fakultetu Univerziteta u Beogradu, sa srednjom ocenom 8.51. Diplomski rad pod naslovom "Sulfatovanje jestivih ulja" odbranila je na Katedri za organsku hemijsku tehnologiju sa ocenom 10. Od 1996. godine zaposlena je u Institutu Nikola Tesla na poslovima ispitivanja transformatorskih ulja i papirne izolacije. Aprila 2004. godine odbranila je sa ocenom 10 magistarsku tezu pod naslovom "Rerafinacija otpadnih mineralnih elektroizolacionih ulja ekstrakcijom sa N-metil-2-pirolidonom" na Katedri za organsku hemijsku tehnologiju Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu. Dobitnik je nagrade Privredne komore grada Beograda za magistarsku tezu za školsku 2003/2004. godinu.

U Institutu Nikola Tesla specijalizovana je u oblasti ispitivanja papirno-uljne izolacije i u dijagnostici stanja energetskih i mernih transformatora, posebno u domenu kompleksne dijagnostike velikih energetskih transformatora u proizvodnji i prenosu električne energije. Takođe radi na razvoju: novih metoda detekcije antioksidanata za biljna izolaciona ulja, postupaka re-rafinacije otpadnih mineralnih izolacionih ulja, postupaka re-rafinacije ulja koja sadrže korozivni sumpor i na razvoju postupaka dekontaminacije mineralnih ulja kontaminiranih sa polihlorovanim bifenilima. Mr Jelena Lukić se bavi i istraživanjima u oblasti ispitivanja mehanizama starenja čvrste izolacije, mehanizama oksidacije ulja, stvaranja elektroprovodnih kontaminanata i detekcije produkata degradacije.

Mr Jelena Lukić je aktivan član međunarodnih udruženja i asocijacija iz oblasti dielektika u elektro-energetskoj primeni. Predsednik je nacionalnog komiteta IEC TC 10:

Fluidi u elektrotehničkim primeni i delegat je nacionalnog komiteta Srbije u Međunarodnoj Elektrotehničkoj Komisiji (IEC TC 10). Aktivno učestvuje u radu sedam IEC TC 10 radnih grupa: IEC TC 10 WG 17, IEC TC 10 MT 21, IEC TC 10 MT 22, IEC TC 10 MT 24, IEC TC 10 JWG 33, IEC TC 10 WG 34 i IEC TC10 WG 35, čije su aktivnosti posvećene problematici izolacionih ulja i izolacionog sistema transformatora. Mr Jelena Lukić učestvuje u aktivnostima Međunarodnog udruženja velikih električnih mreža (CIGRE) u okviru radnih grupa CIGRE A2 (transformatori) A2.32., A2.40 (convener), A2.45, A2/D1.46, A2/D1.47 i CIGRE D1.30 (materijali i savremene tehnologije). Takođe je učestvovala u istraživačkim i razvojnim projektima Ministarstva nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije i Elektroprivrede Srbije. Trenutno rukovodi projektima za ALSTOM GRID (Francuska) i Elektroprivredu Srbije.

OBJAVLJENI NAUČNI I STRUČNI RADOVI I SAOPŠTENJA

M21 - Rad u vrhunskom međunarodnom časopisu

1. **Jelena Lukić**, Aleksandar Orlović, Michael Spiteller, Jovan Jovanović, Dejan Skala "Rerefining of waste mineral insulating oil by extraction with N-methyl-2-pyrrolidone", *Separation and Purification Technology* (2006), **51**(2), 150-156; ISSN 1383-5866; IF=2.497.
2. **Jelena Lukić**, Srđan Milosavljević, Aleksandar Orlović "Degradation of Insulating Systems of Power Transformers by Copper Sulfide Deposition: Influence of Oil Oxidation and Presence of Metal Passivators", *Industrial & Engineering Chemistry Research* (2010), **49**, 9600-9608; ISSN 0888-5885; IF=2.072.

M31 – Predavanje po pozivu sa međunarodnog skupa štampano u celini

1. **J.Lukić**, "Oil oxidation – role of oil inhibitors", My Transfo 2008, Torino, 17-18 December 2008.
2. **J.Lukić**, "Oxidation Phenomena and Role of Oil Inhibitors", My Transfo do Brasil, Rio de Janeiro, 20-24 September 2009.

M33 – Saopštenje sa međunarodnog skupa štampano u celini

1. **J.Lukić**, A.Orlović, D.Skala, J.Jovanović, Assessment of Waste Insulating Oil Rerefining by Extraction With N-Methyl-2-Pyrrolidone Regarding Oxidation Stability and Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Content, The Sixth European Meeting on Environmental Chemistry, Belgrade, 6-10 December, 2005.
2. **J.Lukić**, S.Teslić, K. Drakić, S. Daković, S. Milosavljević, R. Đukanović, Insulation Reconditioning and Oil Reclamation Processes Applied In Transformer Life Management, Romania CIGRE D1, Calimanesti, 19-20 September 2007.
3. **J.Lukic**, V.Radin, M.Bokorov, A.Orlović, Selective Liquid-liquid extraction in corrosive oils re-refining, 42 Paris CIGRE Session, SC A2-216, 24-28 August 2008.
4. **J.Lukić**, S.Teslić, Đ.Jovanović, S.Milosavljević, D.Kovačević Institut "Nikola Tesla, Power Transformers Condition Based Assessment Derived from Paper/Oil Analysis", 6. MAKO CIGRE Savetovanje, 4-6 Oktobar, Ohrid 2009.

5. R.Maina, V.Tumiatti, M.C.Bruzzoniti, R.M.De Carlo, **J.Lukić**, D.Naumović-Vuković, Copper Dissolution and Deposition Tendency of Insulating Mineral Oils Related to Dielectric Properties of Liquid and Solid Insulation, 16th International Conference on Dielectric Liquids, Trondheim, June 26-30, 2011.
6. **J.Lukić**, Đ.Jovanović, S.Milosavljević, Z.Radaković, Z.Božović, S.Spremić, „Post- Mortem Analysis and In Service Diagnostics of Three Different Case Studies of Transformers with Extreme Hydrogen Gassing“, CIGRE A2&D1 Colloquium, PS1-P-12, Kyoto 2011.

M53 – Rad u naučnom časopisu nacionalnog značaja

1. **J.Lukić**, K.Drakić, V.Radin, V.Ivančević, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla", Upporedna analiza efekata regeneracije korišćenih transformatorskih ulja primenom prirodnih i sintetičkih adsorbenata na bazi alumino-silikata, Zbornik radova Elektrotehničkog Instituta „Nikola Tesla“, UDK: 621.315.615; 661.183.4; 661.183.6, BIBLID: 0350-8528 (2005), 17.p. 45-52
2. **J.Lukić**, S.Teslić, Đ.Jovanović, S.Milosavljević, D.Kovačević Institut "Nikola Tesla", ANALIZE IZOLACIONOG ULJA I PAPIRA PRIMENJENE U DIJAGNOSTICI POGONSKOG STANJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA, UDK: 621.315.61; 621.314.21, Elektroprivreda, broj 3, 2008, strana 3-16.
3. Branka Bošković, Slađana Teslić, **Jelena Lukić**, Elektrotehnički Institut "Nikola Tesla", Voda u izolacionom sistemu energetskih transformatora, Zbornik radova Elektrotehničkog Instituta „Nikola Tesla“, UDK: 621.315.615, BIBLID: 0350-8528 (2008-2009), 19.p. 287-297

M63 – Saopštenje sa skupa nacionalnog značaja štampano u celini

1. **J.Lukić**, K.Drakić, S.Gavrančić, Međulaboratorijsko ispitivanje transformatorskih ulja - IEC TC 10 WG 17 Round Robin Test - Određivanje kiseinskog broja kolorimetrijskom titracijom, JUKO CIGRE, Zlatibor, 29.05.-3.06. 2005.
2. **J.Lukić**, A.Bojković, S.Gavrančić, K.Drakić, J.Jovanović, D.Teslić, Dijagnostika pogonskog stanja čvrste izolacije transformatora analizom derivata furana i stepena polimerizacije papira, JUKO CIGRE, Zlatibor, 29.05.- 3.06. 2005.
3. **J.Lukić**, S.Daković, S.Milosavljević, Č.Ponoćko, Analiza i optimizacija Procesu sušenja pairno/uljnog Izolacionog Sistema Transformatora „TRO“ Sa TS SMEDEREVO 3 T2, JUKO CIGRE, V.Banja, 30.09 -5.10.2007.
4. **J.Lukić**, S.Teslić, S.Milosavljević Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Srbija, V.Kaluderović Kombinat Aluminijuma Podgorica, Crna Gora, Korozivni sumpor u transformatorskom ulju – rizici u eksploataciji i načini rešavanja problema, A2-12, 29.savetovanje CIGRE SRBIJA 2009, 30.05. -06.06.2009.
5. **J.Lukić**, S.Teslić, J.Savić, S.Daković, S.Milosavljević, R.Đukanović, M.Antić, M.Veličković, REVITALIZACIJA PAPIRNO/ULJNE IZOLACIJE U FUNKCIJI PRODUŽENJA ŽIVOTNOG VEKA TRANSFORMATORA, R 3.7, CIRED Vrnjačka Banja 2008.

6. **J.Lukić**, Slađana Teslić, Srđan Milosavljević, V.Kaluđerović, Korozivnost transformatorskih ulja: faktori rizika i načini rešavanja problema, I savetovanje CG CIGRE, A2-05, 12-16-Oktobar, 2009, Pržno, Crna Gora.
7. **J.Lukić**, D.Nikolić, V.Mandić, S.Milosavljević, A.Orlović, „Dekontaminacija PCB kontaminiranih transformatora“, P A2 01, 30.savetovanje CIGRE Srbija, Zlatibor, 29.05.-03.06.2011.

OBRAZLOŽENJE TEME

Naučna oblast

Istraživanja u okviru ove doktorske disertacije pripadaju naučnoj oblasti Hemija i hemijska tehnologija za koju je Tehnološko-metalurški fakultet Univerziteta u Beogradu matična ustanova.

Predmet istraživanja

Predmet istraživanja ove doktorske disertacije predstavljaju fenomeni degradacije papirno-uljne izolacije energetskih transformatorima, koji se odvijaju u uslovima povišenih temperatura i pod dejstvom električnih i magnetnih polja. Na pojavu i odvijanje procesa degradacije utiču prisustvo kiseonika, prisustvo metala kao i prisustvo određenih tipova organskih sumpornih jedinjenja u izolacionim uljima. U okviru ove doktorske disertacije biće ispitivani i proučavani mehanizmi degradacije mineralnih izolacionih ulja tokom eksploatacije, procesi oksidacije mineralnih izolacionih ulja, stvaranje elektro-provodnih jedinjenja kao nus-produkata degradacije i ispitivanje uticaja ovih procesa na izolacione osobine papirno-uljnog dielektrika. U okviru ispitivanja procesa degradacije papirno-uljne izolacije energetskih transformatora biće ispitivani: grupno-strukturni sastav mineralnih izolacionih ulja, uticaj policikličnih aromatskih ugljovodonika, uticaj različitih tipova organskih sumpornih jedinjenja, uticaj prisustva različitih uljnih aditiva (antioksidanata, metal pasivatora i deaktivatora) i uticaj bakra kao katalizatora oksidacije organskih jedinjenja.

U okviru ove doktorske disertacije istraživaće se i proces solventne ekstrakcije za uklanjanje polarnih produkata oksidacije ulja i organskih sumpornih jedinjenja, koja imaju afinitet ka stvaranju elektro-provodnih filmova bakar (I) sulfida na bakarnom provodniku i papirnoj izolaciji. Proces solventne ekstrakcije sa izabranim solventom (N-metil-2 pirolidon) će se optimizovati u domenu ključnih procesnih parametara kao što su: istostrujni i suprotnostrujni proces, broj podova, temperaturni gradijent ekstrakcije, prisustvo ko-solventa i optimalna koncentracija ko-solventa.

Naučni ciljevi istraživanja

Naučni ciljevi istraživanja u okviru ove doktorske disertacije su:

- istraživanja procesa degradacije papirno-uljne izolacije u uslovima prisustva i odsustva di-benzil disulfida u mineralnom izolacionom ulju,
- ispitivanje procesa formiranja bakar (I) sulfida na papirnoj izolaciji u uslovima prisustva kiseonika u mineralnom izolacionom ulju na povišenoj temperaturi,
- formulisanje mehanizma degradacije papirno-uljne izolacije u prisustvu organskih disulfida i bakarnih provodnika,

- određivanje uticaja metal pasivatora (toluil triazola) na proces formiranja slojeva bakar (I) sulfida na papirnoj izolaciji,
- ispitivanje solventne ekstrakcije tečno-tečno sa N-metil-2-pirolidonom u cilju uklanjanja prekursora u procesu formiranja slojeva bakar (I) sulfida,
- optimizacija procesnih parametara solventne ekstrakcije: tip proticanja, broj podova, temperaturni gradijent ekstrakcije, prisustvo ko-solventa i optimalna koncentracija ko-solventa.

Metode istraživanja

U izradi ove doktorske disertacije korišće se sledeće analitičke instrumentalne tehnike za istraživanje mehanizama degradacije i verifikaciju procesa solventne ekstrakcije: gasna hromatografija (GC-AED i GC-ECD) za određivanje koncentracije di-benzil disulfida, energetska disperzivna fluorescencija X- zraka (EDXRF) za određivanje ukupnog sadržaja sumpora, infracrvena spektroskopija za određivanje sadržaja aromatskih jedinjenja i antioksidanata fenolnog tipa, atomska apsorpciona spektroskopija za određivanje sadržaja bakra u izolacionom papiru, tečna hromatografija visokih performansi za određivanje koncentracije derivata furana i metal pasivatora na bazi benzotriazola i toluil triazola, skenirajuća elektronska mikroskopija i elektron disperzivna difrakcija za određivanje hemijskog sastava depozita na izolacionom papiru.

Primenska ispitivanja koja će se koristiti za istraživanje mehanizama degradacije i verifikaciju procesa solventne ekstrakcije su: kiselinski broj ulja, faktor dielektričnih gubitaka ulja, potencimetrijske titracija za određivanje sadržaja disulfida, merkaptana i elementarnog sumpora, test za određivanje depozita bakar (I) sulfida na bakarnom provodniku i papirnoj izolaciji (IEC 62535), određivanje specifične površinske otpornosti papira i stepena polimerizacije papira, oksidaciona stabilnost mineralnih izolacionih ulja i indeks prelamanja ulja.

U izradi ove doktorske disertacije korišće se laboratorijske tehnike ekstrakcije tečno-tečno koje omogućavaju sistematično istraživanje optimalnih procesnih parametara solventne ekstrakcije. Istraživanje procesa ekstrakcije će obuhvatiti ispitivanje uticaja i optimizaciju sledećih parametara procesa ekstrakcije: tip proticanja, broj podova, temperaturni gradijent ekstrakcije, prisustvo ko-solventa i optimalna koncentracija ko-solventa.

Očekivani rezultati

Rezultati istraživanja u okviru ove doktorske disertacije doprineće razumevanju procesa degradacije papirno-uljne izolacije energetskih transformatora do koje dolazi usled formiranja provodnih slojeva bakar (I) sulfida na površini izolacionog papira. Takođe, u okviru ovih istraživanja ispitaće se i efikasnost procesa solventne ekstrakcije sa N-metil-2-pirolidonom u cilju uklanjanja prekursora bakar (I) sulfida iz izolacionih ulja. Ovi rezultati će dati doprinos u pogledu razumevanja fenomena degradacije kao i u pogledu rešavanja problema pouzdanosti energetskih transformatora, a time i celog elektro-energetskog sistema.

Aktuelnost problematike u svetu

Energetski transformatori predstavljau jedan od ključnih elemenata elektro-energetskog sistema te je stoga neophodno obezbediti njihov pouzdan rad. U uslovima

rada energetskih transformatora, koje karakterišu povišena temperatura i prisustvo elektro-magnetnih polja, dolazi do pojave procesa degradacije papirno-uljnog dielektrika. Ovi procesi mogu dovesti do formiranja provodnih slojeva bakar (I) sulfida na papirnom izolatoru što može usloviti i havarijska stanja energetskih transformatora. Nakon nekoliko akcidenata koji su zabeleženi u uslovima preopterećenja energetskih transformatora, procesi degradacije koje prati formiranje bakar (I) sulfida na papirnom izolatoru su dospeli u centar interesovanja stručne javnosti. Stoga je u poslednje vreme značajna istraživačka aktivnost posvećena istraživanju procesa formiranja bakar (I) sulfida u izolacionom sistemu energetskih transformatora. Značajne istraživačke i razvojne aktivnosti su usmerene i ka razvoju procesa koji bi se mogao koristiti za efikasno uklanjanje prekursora bakar (I) sulfida iz izolacionih ulja.

Najvažniji literaturni podaci koji podržavaju temu:

1. Wiklund, P. Chemical Stability of Benzotriazole Copper Surface Passivators in Insulating Oils. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2007**, 46, 3312.
2. Crisostomo, R.R.; Neto, R. Thermo-oxidative stability of mineral naphtenic insulating oils. Combined effect of antioxidants and metal passivators. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2004**, 43, 7428.
3. Toyama, S.; Tanimura, J.; Yamada, N.; Nagao E.; Amimoto, T. Highly Sensitive Detection Method of Dibenzyl Disulfide and the Elucidation of the Mechanism of Copper Sulfide Generation in Insulating Oil. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2009**, 16, 509.
4. Scattigio, F.; Tumiatti, V.; Maina, R.; Tumiatti, M.; Pompili M.; Bratnikas, R.; Corrosive Sulfur In Insulating Oils: Its Detection and Correlated Power Apparatus Failures. *IEEE Trans. Power Del.* **2008**, 23, 508.
5. Amimoto, T.; Nagao, E.; Tanimura, J.; Toyama, S.; Fujita, Y.; Kawari H.; Yamada, N.; Identification of Affecting Factors of Copper Sulfide Deposition on Insulating Paper in Oil. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2009**, 16, 265.
6. Wiklund, P.; Levin, M.; Pahlavanpour, B. Copper Dissolution and Metal Passivators in Insulating Oil. *IEEE Electrical Insulating Magazine* **2007**, 23(4), 1.
7. Amimoto, T.; Nagao, E.; Tanimura, J.; Toyama S.; Yamada N. Duration and Mechanism of Suppressive Effect of Triazole-based Passivators on Copper-sulfide Deposition on insulating paper. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **2009**, 16, 257.
8. Voronkov, M.G.; Panova, G.M.; Timokhina, L.V.; Gromkova, R.A. Thermal Reactions of Dibenzyl Disulfide and Dibenzyl Sulfide with Metals: A New Route to trans-stilbene and Dibenzyl. *Russ. J. Gen. Chem.* **2004**, 74(7), 1043.
9. Kalantar, A.; Levin, M. Factors affecting the dissolution of copper in transformer oils. *Lubr. Sci.* **2008**, 20, 223.
10. Han, Q.; Zhu, J.; Zhu, W.; Jang, X.; Lu, L.; Wang, X. Spontaneous growth of Copper sulfide nanowires from elemental sulfur in carbon-coated Cu grids. *Mater. Lett.* **2009**, 63, 2358.

ZAKLJUČAK

Na osnovu iznetih podataka Komisija smatra da je tema predložene doktorske disertacije pod nazivom **PROCESI DEGRADACIJE PAPIRNO-ULJNE IZOLACIJE ENERGETSKIH TRANSFORMATORA I RAFINACIJA DEGRADIRANIH MINERALNIH IZOLACIONIH ULJA EKSTRAKCIJOM TEČNO-TEČNO SA N-METIL-2-PIROLIDONOM** naučno zasnovana i predlaže Nastavno-naučnom veću da je prihvati. Za mentora se predlaže Dr Aleksandar Orlović, vanredni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu, a za komentora Dr Dušan Antonović, redovni profesor Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

U Beogradu, 05.12.2011.

Članovi Komisije

Dr Aleksandar Orlović, vanredni profesor
Tehnološko-metalurškog fakulteta Univerziteta u
Beogradu,

Dr Dušan Antonović, redovni profesor Tehnološko-
metalurškog fakulteta Univerziteta u Beogradu,

Dr Zoran Radaković, redovni profesor
Elektrotehničkog fakulteta Univerziteta u Beogradu,

Dr Sava Veličković, docent Tehnološko-metalurškog
fakulteta Univerziteta u Beogradu.