

DOI: [10.46793/CIGRE37.A2.03](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.A2.03)**A2.03****KOROZIJA SREBRNIH KONTAKATA TERETNE REGULACIONE PREKLOPKE I
MERE MITIGACIJE****CORROSION OF SILVER CONTACTS OF ON-LOAD TAP CHANGERS AND
MITIGATION MEASURES****Dejan Kolarski, Jelena Lukić, Valentina Vasović, Jelena Janković, Draginja
Mihajlović, Ivan Mitrović*, Milan Đorđević***

Kratak sadržaj: Prisustvo elementarnog sumpora u izolacionoj tečnosti transformatora čak i u tragovima dovodi do formiranja elektroprovodnog srebra (I) sulfida na niskim radnim temperaturama transformatora, pri čemu su najugroženiji kontakti biračkog dela teretne regulacione preklopke (TRP). U okviru međunarodne organizacije CIGRE trenutno je u toku radna grupa koja se bavi problemom korozije srebra u transformatorima (CIGRE A2 Task Force on Silver Corrosion). U fokusu je istraživanje porekla prisustva korozivnih sumpornih jedinjenja u mineralnim izolacionim uljima i estrima, metode detekcije, prikaz slučajeva iz prakse, analiza rizika eksploatacije i mere mitigacije. Ispitivanje izolacionih tečnosti (mineralnih ulja ili sintetskih estara) na prisustvo korozivnih sumpornih jedinjenja prema srebru vrši se standardizovanim testovima korozije ASTM D 1275 i DIN 51353 i kvantitativnim testovima za utvrđivanje tačne koncentracije sumpornih jedinjenja (IEC 62697-1, IEC 62697-2, IEC TR 62697-3). U cilju efikasnije procene korozije srebra u Institutu je razvijena nova metoda ispitivanja korozije srebra, koja je unapređena u odnosu na postojeću standardizovanu ASTM i DIN metodu. U okviru projekta Fonda za nauku Republike Srbije pod akronimom GreenCleanS razvijena je inovativna tehnologija koja je uspešno primenjena u realnom okruženju na lokaciji TE Kolubara A, Veliki Crljeni pri čemu je obrađeno 1500 litara korozivnog ulja sa elementarnim sumporom. Tokom demonstracije tehnologije na lokaciji TE Kolubara A vršena je kontrola parametara procesa i praćenje uticaja na životnu sredinu. Rezultati ispitivanja su ukazali da su izmerene vrednosti u skladu sa dozvoljenim stoga se može zaključiti da je razvijena tehnologija čista, ekološki zatvorena i u skladu sa principima najbolje ekološke prakse (eng. Best Environmental Practices, BEP).

Dejan Kolarski, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, dejan.kolarski@ieent.orgJelena Lukić, ELEKTROTEHNIČKI INSTITUT NIKOLA TESLA, lukicjelena@ieent.orgValentina Vasović, Institut Nikola Tesla, valentina.vasovic@ieent.orgJelena Janković, Institut Nikola Tesla a.d., jelena.jankovic@ieent.orgDraginja Mihajlović, Elektrotehnički institut Nikola Tesla ad Beograd, draginja.mihajlovic@ieent.org*Ivan Mitrović, ЕПС АД, Ivan.Mitrovic@eps.rs*Milan Đorđević, ЕПС АД, djordjevic.milan@eps.rs

Analizom ulja nakon desulfurizacije u realnim uslovima na terenu, potvrđeno je da postupak efikasno uklanja elementarni sumpor ispod limita kvantifikacije uz poboljšanje fizičko-hemijskih i električnih karakteristika ulja. Dobijeni rezultati ukazuju na visok potencijal razvijenog postupka za industrijsku primenu

Ključne reči: *elementarni sumpor; korozivni sumpor; izolacione tečnosti, energetski transformator; GreenCleanS, inovativna tehnologija*

Abstract: The presence of elemental sulfur in transformer insulating fluids, even in trace amounts, leads to the formation of electrically conductive silver (I) sulfide at low operating temperatures, posing a significant threat to on-load tap changer (OLTC) contacts. The International CIGRE organization currently has an active task force addressing the issue of silver corrosion in transformers (CIGRE A2 Task Force on Silver Corrosion). The focus is on investigating the origin of corrosive sulfur compounds in mineral insulating oils and esters, detection methods, case studies, risk assessment, and mitigation strategies. Insulating fluids (mineral oils or synthetic esters) are tested for corrosive sulfur compounds using standardized corrosion tests (ASTM D1275, DIN 51353) and quantitative sulfur analysis (IEC 62697-1, IEC 62697-2, IEC TR 62697-3). To enhance silver corrosion assessment, a new testing method was developed at the institute, improving upon existing ASTM and DIN standards. As part of the GreenCleanS project, funded by the Science Fund of the Republic of Serbia, an innovative desulfurization technology was successfully implemented at Thermal Power Plant Kolubara A located in Veliki Crljeni, treating 1.500 liters corrosive oil with elemental sulfur. During the technology demonstration at the Kolubara A Power Plant, process parameters were monitored, and environmental impact was assessed. The results indicated that the measured values are within permissible limits, leading to the conclusion that the developed technology is clean, environmentally enclosed, and aligned with the principles of Best Environmental Practices (BEP). Oil analysis after desulfurization in real operating conditions confirmed the effective removal of elemental sulfur below the quantification limit, with improved physical-chemical and electrical characteristics of oil. These findings highlight the high potential of the developed process for industrial applications.

Key words: *elemental sulfur, corrosive sulfur, insulating fluids, power transformer, GreenCleanS, innovative technology*

1 UVOD

Problem korozivnog sumpora u izolacionom ulju je veoma dobro poznat u elektroenergetskoj industriji. Prisustvo korozivnog sumpora u transformatorima često se navodi kao uzrok iznenadnih i neočekivanih havarija. Iako se prisustvo korozivnih sumpornih jedinjenja najčešće vezuje za koroziju bakra, sumporna jedinjenja u mineralnom izolacionom ulju mogu reagovati i sa srebrom što dovodi do formiranja depozita srebra sulfida na površinama posrebrjenih kontakata biračkog dela teretne regulacione preklopke (TRP) [1-5]. Korozivnost izolacionog ulja prema ovim metalima može se utvrditi testovima korozije prema bakru i srebru u skladu sa standardima IEC 62535, DIN 51353 i ASTM D1275-15 dok se kvantitativnim testovima utvrđivanju tačne koncentracije sumpornih jedinjenja (IEC 62697-1, IEC 62697-2, IEC TR 62697-3). Elementarni sumpor (S_8), najreaktivnije sumporno jedinjenje koje se detektuje u izolacionom ulju pokazuje veću reaktivnost prema srebru nego prema bakru. Visoka reaktivnost S_8 sa srebrom, u kombinaciji sa niskim koncentracijama potrebnim za formiranje srebra sulfida povećava rizik od havarije elektroenergetskih transformatora.

S obzirom na visok afinitet S_8 prema srebru, kao i na veliku zapreminu ulja u transformatorima u poređenju sa malom površinom posrebranih TRP kontakata čak i nekoliko mg/kg S_8 u ulju može izazvati koroziju srebra pri niskim radnim temperaturama [9-11]. S_8 u ulju nastaje usled nepravilno sprovedenih procesa regeneracije ostarelih mineralnih izolacionih ulja pomoću adsorbenata na bazi aluminijum-oksida i aluminosilikata, ovi procesi uključuju reaktivaciju adsorbenata radi njihove ponovne upotrebe. Reaktivacija adsorbenta se vrši visokotemperaturnim sagorevanjem zauljenog adsorbenta (preko 400°C), i kao nus-proizvod ovog postupka dolazi do formiranja S_8 , koji kontaminira regenerisano ulje [12]. Osim nepravilno izvedene regeneracije ulja, kontaminacija ulja korozivnim sumporom može se desiti i drugim materijalima koji sadrže sumpor kao što su (cementi, zaptivke, prigušnice, lepkovi, nekompatibilna creva) [11]. U okviru projekta GreenCleanS, koji je podržan od strane Fonda za nauku Republike Srbije, razvijena je nova tehnologija koja je uspešno primenjena u realnim uslovima na lokaciji Termoelektrane Kolubara A u Velikim Crljenima. Tokom ovog procesa, tretirano je 1500 litara korozivnog ulja sa elementarnim sumporom. Na lokaciji rada sprovedeno je merenje parametara procesa i procena uticaja na životnu sredinu. Rezultati su pokazali da su sve izmerene vrednosti u okviru dozvoljenih granica, što potvrđuje da je razvijena tehnologija ekološki prihvatljiva, zatvorenog tipa i u skladu sa principima najbolje ekološke prakse (Best Environmental Practices, BEP). Takođe, analiza ulja nakon procesa desulfurizacije u terenskim uslovima potvrdila je efikasnost postupka u uklanjanju elementarnog sumpora ispod granice kvantifikacije, uz poboljšanje fizičko-hemijskih i električnih karakteristika ulja. Ovi nalazi ukazuju na značajan potencijal ove tehnologije za industrijsku primenu.

1.1 Poreklo korozivnog sumpora u transformatoru

Korozivni sumpor predstavlja jedan od ključnih uzroka havarija energetskih transformatora. Razumevanje njegovog porekla od suštinske je važnosti za identifikaciju uzročnika i usvajanje preventivnih mera. Prisustvo korozivnog sumpora može biti posledica specifičnih hemijskih reakcija u izolacionom ulju tokom postupaka regeneracije ili usled prisustva nečistoća u različitim materijalima koji predstavljaju sastavni deo transformatora. Najčešći izvori korozivnog sumpora u izolacionom ulju su:

- Materijali od gume koji se koriste kao zaptivke (cementi, lepkovi na bazi vode, itd.)
- Izolacioni papir, sumpor može biti prisutan u niskim koncentracijama, zaostao tokom procesa proizvodnje papira.
- Reaktivaciju adsorbenta pri čemu nastaje elementarni sumpor, a kojim se dalje vrši regeneracija ulja.

Nisu sva sumporna jedinjenja korozivna, reaktivnost ovih jedinjenja ogleda se u njihovoj sposobnosti da reaguju sa konstrukcionim metalima u transformatoru (bakar, gvožđe, srebro) i formiraju elektroprovodne sulfide metala. Sulfidi metala nisu rastvorni u ulju već se izdvajaju u vidu taloga, tj. depozita na površinama metala i izolacionog papira, formirajući elektroprovodne staze koji mogu biti inicijalna mesta proboja.

Mineralno izolaciono ulje predstavlja glavni izvor reaktivnog, tj. korozivnog sumpora u transformatoru. Jedinjenja sumpora su takođe prisutna u zaptivkama, lepkovima na bazi vode, bakru i papirnoj izolaciji koja se koristi u proizvodnji transformatora. Prisustvo sumpora u ulju može biti i posledica kontaminacije ulja usled primene nekompatibilnih creva [12].

Tokom procesa regeneracije mineralnih ulja sa reaktivacijom korišćenog adsorbenta može doći do formiranja novih jedinjenja sumpora, visoko reaktivnih prema metalima, srebru i bakru. Iskustva iz prakse su pokazala da je, ubrzo nakon izvršenih procesa regeneracije ulja u on-line režimima, sa visoko-temperaturnom reaktivacijom adsorbenata na bazi alumo-silikata („Fuller's earth“) i/ili aluminijum oksida („Bauxite clay“), došlo do havarije transformatora usled korozije srebra, prouzrokovane prisustvom elementarnog sumpora u ulju.

Formiranje elementarnog sumpora moguće je samo na veoma visokim temperaturama, od 400°C i naviše, takvi uslovi se postižu tokom reaktivacije korišćenog adsorbenta (kako bi se sagorele sve organske materije i regenerisao adsorbent za onovnu upotrebu) u uslovima visoko-temperaturnog sagorevanja ulja, na površini adsorbenta, pri čemu dolazi do katalitičkog krekinga ulja (cepanja C-C veze) u prisustvu alumo-silikata i formiranja elementarnog sumpora koji je izrazito reaktivan prema srebru slika 1.



Slika 1: Korozija na srebru unutar suda TRP [16].

1.2 Metode detekcije korozivnih sumpornih jedinjenja

Kako bi se identifikovala i kvantifikovala korozivna sumporna jedinjenja u izolacionom ulju potrebno je sprovesti nekoliko testova. Metode ispitivanja korozivnosti ulja prema srebru mogu se podeliti na kvalitativne i kvantitativne. Kvalitativne metode za utvrđivanje korozivnosti ulja prema srebru su testovi prema sledećim standardima: DIN 51353, koji je veoma osetljiv na prisustvo S₈ u veoma niskim koncentracijama (od 0,5 mg/kg) i ASTM D 1275-15 koji je dovoljno osetljiv za različita korozivna sumporna jedinjenja prema srebru (DBDS, S₈, drugi disulfidi, merkaptani, i dr.). Kvantitativno određivanje tačne koncentracije prisutnih korozivnih sumpornih jedinjenja može se postići primenom nekoliko standardizovanih metoda i to:

1. IEC 62697-1 ed 1.0 (2012) za kvantitativno određivanje sadržaja DBDS-a u mineralnom izolacionom ulju,
2. IEC TR 62697-2 za kvantitativno određivanje sadržaja ukupnih korozivnih sumpornih jedinjenja ili CIGRE WG A2.32 – TF 03 za određivanje koncentracije ukupnih reaktivnih sumpornih jedinjenja (ukupnog sadržaja disulfida, merkaptana i elementarnog sumpora) i
3. IEC TR 62697-3/2018 za kvantitativno određivanje sadržaja S₈ u mineralnom izolacionom ulju.
4. Merenjem povećanja temperature i porastom otpora srebrnih kontakata teretne regulacione preklopke mogu se detektovati naslage srebra sulfida na srebrnim kontaktima TRP, ova merenja su se pokazala kao izuzetno korisni dijagnostički alati [15].

2 RAZVOJ NOVE TEHNOLOGIJE ZA UKLANJANJE ELEMENTARNOG SUMPORA IZ MINERALNIH IZOLACIONIH ULJA

Postupci tretmana ulja kojima se uklanjaju polihlorovani bifenili (PCB) i korozivna sumporna jedinjenja (DBDS), primenom K-PEG ili Na-PEG reagenasa, zahtevaju da se transformator isključi sa mreže i sva količina ulja istoči iz transformatora (tzv. off-line postupci), stoga proces desulfurizacije mineralnog izolacionog ulja treba da se izvrši u kratkom vremenskom roku uz postizanje visokog stepena efikasnosti. Uzimajući u obzir da se postojeći postupci tretmana korozivnog izolacionog ulja sa reagensima nisu pokazali efikasnim u uklanjanju S₈ iz ulja, cilj istraživanja bio je razvoj novog postupka sa kojim bi se S₈ uklonio iz ulja hemijskom konverzijom, na nižim temperaturama, čime bi se omogućio visok stepen desulfurizacije uz postizanje visoke energetske efikasnosti procesa.

U okviru GreenCleanS projekta finansiranog od strane Fonda za nauku Republike Srbije razvijen je novi tehnološki postupak za uklanjanje elementarnog sumpora iz mineralnih izolacionih ulja. Postupak za uklanjanje elementarnog sumpora prošao je kroz sve faze razvoja - od laboratorijskih istraživanja, preko testiranja na pilot postrojenju, do uspešne primene u realnim uslovima na lokaciji TE Kolubara A, Veliki Crljeni.

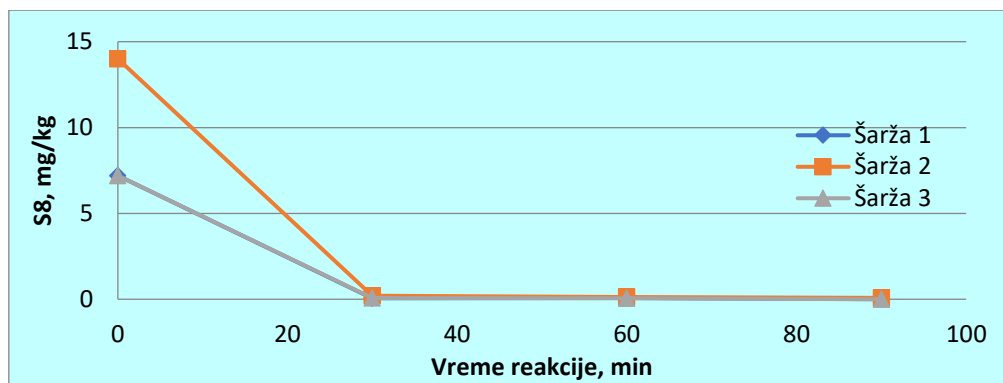
Tokom laboratorijskih istraživanja određena je najefikasnija reagens smeša za uklanjanje S₈ iz ulja kao i optimizacija postupka. Dobijeni rezultati su pokazali da su ključni parametri koji utiču na brzinu i stepen uklanjanja sumpora: temperatura, vreme kontakta i maseni odnos reagensa. Na osnovu određenih optimalnih parametara sa laboratorijskih eksperimenata, postupak je dalje testiran na pilot postrojenju kako bi se ispitala skalabilnost i primenljivost postupka u industrijskim uslovima. Tehnologija je dalje primenjena na terenu, gde su potvrđeni njena efikasnost i primenljivost u realnim uslovima.

2.1 Demonstracija tehnologije u industrijskim uslovima

Demonstracija tehnologije u realnim uslovima na lokaciji TE Kolubara A, Veliki Crljeni obuhvatala je tretman mineralnog izolacionog ulja iz pogona u tri šarže, pri čemu je svaka šarža sadržala po 500 litara ulja. Prva šarža je sadržala 7,2 mg/kg S₈, 68 mg/kg DBDS i 42 mg/kg PCB kako bi se simulirala integralna tehnologija za uklanjanje svih neželjenih jedinjenja iz mineralnih izolacionih ulja. Druga šarža je imala 14,0 mg/kg S₈, što predstavlja koncentraciju za 30% višu od najviše zabeležene u praksi, dok je treća šarža sadržala 7,2 mg/kg S₈, što odgovara tipičnim koncentracijama sumpora u ulju iz havarisanih energetskih transformatora u radu.

Tokom postupka desulfurizacije, na svakih 30 minuta uziman je uzorak za praćenje promene sadržaja S₈ u ulju. Kvantitativnim određivanjem S₈ u ulju utvrđeno je da se reakcija desulfurizacije odigrava veoma brzo, već nakon 30 minuta od početka reakcije sadržaj S₈ u ulju snižen je ispod 0,5 mg/kg dok je nakon 90 minuta S₈ iz ulja potpuno uklonjen, slika 2.

Analizom ulja nakon desulfurizacije u realnim uslovima na terenu, potvrđeno je da postupak efikasno uklanja elementarni sumpor ispod limita kvantifikacije uz poboljšanje fizičko-hemijskih i električnih karakteristika ulja. Dobijeni rezultati ukazuju na visok potencijal razvijenog postupka za industrijsku primenu. U tabeli 1 prikazane su karakteristike ulja pre i nakon tretmana.



Slika 2: Promena sadržaja elementarnog sumpora u ulju tokom postupka desulfurizacije prve, druge i treće šarže

Tabela 1: Karakteristike ulja pre i nakon tretmana prve šarže

Karakteristike ulja						
	S ₈ , mg/kg	Neutralizacioni broj, mgKOH/g	Međufazni napon ulje/voda, mN/m	Faktor dielektričnih gubitaka, ‰	DBDS, mg/kg	PCB, mg/kg
Pre tretmana	7,2	0,014	28	1,4	68	42
Nakon tretmana	Nije detektovan	0,00	46	0,5	Nije detektovan	9

U tabeli 2 su prikazani rezultati testa korozije prema ASTM D 1275-15 standardu, SEM-EDX analiza srebrne pločice pre i nakon tretmana ulja i ispitivanje ulja na prisustvo metalnih čestica nakon tretmana.

Tabela 2: Rezultati testa korozije (ASTM D1275-15), SEM-EDX analiza srebrne pločice pre i nakon tretmana, i analiza ulja na prisustvo metalnih čestica nakon tretmana.

Karakteristike ulja		
	Pre tretmana	Nakon tretmana
Sadržaj bakra i gvožđa u ulju, mg/g	/	Nije detektovan
SEM-EDX analiza srebrne pločice, S mas. %	10,5 – 10,9	Nije detektovan
ASTM D 1275-15	Korozivno	Nije korozivno
Srebrna pločica nakon ASTM D 1275-15 testa		

U skladu sa Monitoring planom, vršena je kontrola hemijskih štetnosti i praćenje uticaja na životnu sredinu pre primene tehnologije, u toku i po završetku demonstracije tehnologije na terenu. Praćeni su sledeći parametri:

- Hemijski parametri u vazduhu: Polihlorovani bifenili, ugljovodonici C10-C40 i policiklični aromatski ugljovodonici.
- Hemijski parametri u zemljištu: Polihlorovani bifenili, ugljovodonici C10-C40 i policiklični aromatski ugljovodonici.
- Merenje nivoa buke u radnom okruženju,
- Elektromagnetno zračenje

Rezultati ispitivanja su ukazali da su izmerene vrednosti parametara u vazduhu u skladu sa dozvoljenim, odnosno primenjene su propisane mere bezbednosti i zdravlja na radu.

Rezultati ispitivanja zemljišta su pokazali da je kvalitet zemljišta održiv, funkcije zemljišta nisu ugrožene odnosno nisu prekoračene remedijacione vrednosti.

Izmereni nivo buke je bio ispod propisanih granične vrednosti, dok je nivo elektromagnetnog zračenja je daleko ispod akcionih vrednosti koje su propisane Regulativama. Stoga se može zaključiti da je razvijena tehnologija čista, ekološki zatvorena i u skladu sa principima najbolje ekološke prakse (eng. Best Environmental Practices, BEP).

3 ZAKLJUČAK

Rezultati istraživanja potvrđuju da prisustvo elementarnog sumpora (S₈) u mineralnom izolacionom ulju predstavlja ozbiljan rizik za energetske transformatore, naročito zbog njegove visoke reaktivnosti prema srebru. Razvijena tehnologija u okviru GreenCleanS projekta uspešno je demonstrirana u realnim uslovima, pri čemu je tretirano 1500 litara korozivnog ulja. Dobijeni rezultati ukazuju na mogućnost primene razvijenog GreenCleanS postupka desulfurizacije kao efikasnog i održivog rešenja za uklanjanje S₈ iz mineralnog izolacionog ulja uz produženje životnog veka energetskih transformatora. Pored toga, primenom razvijenog postupka istovremeno se smanjuje negativan ekološki i ekonomski uticaj prakse odlaganja ostarelog i korozivnog mineralnog izolacionog ulja. Nakon primene tehnologije, sve fizičke, hemijske i električne karakteristike ulja su poboljšane dok je test korozivnosti ulja prema standardu ASTM D1275-15 pokazao da ulje nije korozivno prema srebru, sadržaj metala u ulju nakon primene tehnologije bili su ispod limita detekcije. Pored visoke efikasnosti u uklanjanju elementarnog sumpora, pokazano je da je proces ekološki prihvatljiv i da ne generiše štetne nusproizvode, čime ispunjava zahteve najbolje ekološke prakse (BEP).

Zahvalnica: Istraživanje sprovedeno uz podršku Fonda za Nauku Republike Srbije, broj projekta 6700, Development of green technology to mitigate power transformer failures induced by elemental sulphur and change current hazardous practice in transformer oil regeneration – GreenCleanS.

Iskreno se zahvaljujemo akcionarskom društvu „Elektroprivreda Srbije” i Termoelektrani Kolubara A na velikodušnoj podršci i izuzetnoj saradnji tokom realizacije GreenCleanS projekta.

LITERATURA

- [1] Holt A. F.; Facciotti M.; Amaro P.; Brown R. C. D.; Lewin P. L.; Pilgrim J. A. Silver Corrosion in Transformers. Published in: 2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Chenzhen, China, 20-23 October 2013, IEEE
- [2] F. Scatiggio, V. Tumiatti, R. Maina, M. Tumiatti, M. Pompili, and R. Bartnikas. Corrosive sulfur in insulating oils: Its detection and correlated power apparatus failures. *Power Delivery, IEEE Transactions on*, 23(1):508 –509, jan. 2008.
- [3] Holt, A.F.; Facciotti, M.; Amaro, P.; Brown, R.C.D.; Lewin, P.L.; Pilgrim, J.A.; Wilson, G.; Jarman, P. An initial study into silver corrosion in transformers following oil reclamation. In *Proceedings of the 2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Ottawa, ON, Canada, 29 August 2013; IEEE: Manhattan, NY, USA, 2013; pp. 469–472. DOI: 10.1109/EIC.2013.6554290
- [4] Jankovic J.; Lukic J.; Kolarski D.; Veljović D.; Radovanović Ž.; Dimitrijević S. Isotherm, Thermodynamic and Kinetic Studies of Elemental Sulfur Removal from Mineral Insulating Oils Using Highly Selective Adsorbent. *Materials*. 2023; 16 (9) 3522. <https://doi.org/10.3390/ma16093522>
- [5] Jankovic, J.; Lukic, J.; Planojevic, J.; Kolarski, D.; Janackovic, DJ. Application of Highly Selective Adsorbent in the Removal of Elemental Sulfur and Other Corrosive Sulfur Compounds From Mineral Insulating Oils. *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* 2022, 29, 54–61. DOI: 10.1109/TDEI.2022.3148479
- [6] International Electrotechnical Commission. Insulating liquids-test method for detection of potentially corrosive sulphur in used and unused insulating oil, IEC 62535-2008.
- [7] Deutsches Institut für Normung. Testing of insulating oils, Detection of corrosive sulfur, silver strip test, Standard 51353, 1985
- [8] ASTM international. Standard Test Method for Corrosive Sulfur in Electrical Insulating Liquids, ASTM D1275-15, ASTM, 2015
- [9] Lukic, J.; Jankovic, J.; Planojevic, J.; Foata, M.; Zieglschmid, C.; Castano, V.; Briotto, A. Silver Sulphide in OLTCs—Root Causes and Proactive Mitigation Strategies. In *Proceedings of the TechCon, Aus-NZ*, Sydney, Australia, 4–5 April 2019.
- [10] L. Lewand, The role of corrosive sulfur in transformers and transformer oil (2002). Doble Engineering Company, USA. https://www.doble.com/wp-content/uploads/2002_3B.pdf (accessed, February 2025).
- [11] Foata, M.; Lindl, K.H.; Da Costa, M.; Lukic, J.; Jankovic, J.; Mihajlovic, D. Risk Assessment and Mitigation of Corrosive Sulphur Other than DBDS. In

Proceedings of the Cigre Brasil X Workspot, Foz do Iguaçu, Brazil, 27–30 November 2022.

- [12] Lewand L, 2002, “The role of corrosive sulfur in transformers and transformer oil”, In Proceedings of the 69th Annual International Doble Client Conference, Boston, MA, USA, pp 7–12
- [13] IEC 62697 - Part 1: Test method for quantitative determination of dibenzylidissulfide (DBDS), 2012.
- [14] IEC TR 62697 - Part 2: Test method for quantitative determination of total corrosive sulfur (TCS), 2018.
- [15] IEC TR 62697 – Part 3: Test method for quantitative determination of elemental sulfur, 2018.
- [16] CIGRE Brošura 625 - COPPER SULPHIDE LONG TERM MITIGATION AND RISK ASSESSMENT