

Rezultati GreenCleanS projekta Fonda za nauku Republike Srbije

Dejan Kolarski¹, Jelena Lukić¹, Valentina Vasović¹, Jelena
Janković¹, Draginja Mihajlović¹

¹Univerzitet u Beogradu, Elektrotehnički institut Nikola Tesla, Koste Glavinića 8a,
11000 Beograd, Srbija

dejan.kolarski@ieent.org

Kratak sadržaj: Projekat podržan od strane Fonda za nauku Republike Srbije *Development of green technology to mitigate power transformer failures induced by elemental sulphur and change current hazardous practice in transformer oil regeneration*, pod akronimom *GreenCleanS* obuhvata razvoj nove tehnologije za uklanjanje elementarnog sumpora (S₈), iz mineralnih izolacionih ulja energetskih transformatora (ET) primenom inovativnog nisko-temperaturnog postupka desulfurizacije. Razvoj tehnologije obuhvata eksperimentalan rad na laboratorijskom nivou i pilot postrojenju (nivo tehnološke spremnosti, eng. technology readiness level, TRL 4), kao i demonstraciju tehnologije u operativnom okruženju, tretmanom 3 tone ulja u mobilnom postrojenju za desulfurizaciju, kako bi se dostigao TRL 7. Primena nove, inovativne tehnologije doprineće smanjenju broja havarija transformatora punjenih mineralnim uljima koja sadrže S₈, izrazito korozivno jedinjenje prema srebru, i produženju životnog veka elektro-energetske opreme.

Ključne reči: elementarni sumpor, energetski transformatori, GreenCleanS, desulfurizacija, korozija

1. Uvod

Energetski transformatori predstavljaju ključne elemente u elektro-energetskim mrežama, a njihova visoka pouzdanost je od suštinskog značaja za stabilnost celokupnog energetskog sistema. Tokom eksploatacije, energetski transformatori su izloženi brojnim rizicima, među kojima je i prisustvo korozivnog sumpora u izolacionim uljima. Eksploatacija korozivnih izolacionih ulja dovodi do formiranja visokoprovodnih sulfida metala, što najčešće dovodi do havarija transformatora [1-4]. Dok je korozivnost

mineralnih izolacionih ulja prema bakru, usled prisustva dibenzil-disulfida (DBDS), detaljno istražena, korozija srebra usled prisustva S₈ u izolacionim uljima je relativno noviji problem. Prisustvo S₈ u uljima predstavlja veliki problem usled velikog afiniteta S₈ da reaguje sa srebrom pri niskim operativnim temperaturama (ispod 60°C), čime su najugroženiji posebnosti kontakti teretne regulacione preklopke (TRP) [5-8].

Procesima regeneracije izolacionih ulja korišćenjem adsorbenata kojima se uklanjaju produkti starenja, uključujući i korozivni DBDS, produžava se životni vek ulja, a samim tim i energetskih transformatora. Primenjeni adsorbenti efikasno uklanjaju korozivna sumporna jedinjenja zajedno sa produktima starenja ulja. Da bi se smanjili troškovi regeneracije ulja, istrošeni adsorbent se reaktivira pirolitičkim postupkom na temperature preko 600 °C. Međutim, ukoliko se reaktivacija adsorbenata na visokim temperaturama vrši pri nedovoljnoj količini kiseonika, adsorbovana sumporna jedinjenja se konvertuju u elementarni sumpor i ostaju u adsorbentu. Kada se ovako reaktivirani adsorbent koristi za dalju regeneraciju ulja, ili regeneraciju ulja drugih transformatora, može doći do kontaminacije ulja sa elementarnim sumporom. Kontaminacija elementarnim sumporom se dalje može širiti na druga ulja, upotrebom mašina, cisterni ili burića koji su bili u kontaktu sa takvim uljem [9-12].

GreenCleanS projekat predstavlja inovativno rešenje problema prisustva korozivnog sumpora, pre svega S₈ u mineralnim uljima ET, primenom inovativnog nisko-temperaturnog tehnološkog postupka desulfurizacije. Primenom GreenCleanS tehnologije kao ekološki zatvorene tehnologije smanjiće se zagađenje i ugljeni otisak energetskih transformatora što će imati veliki uticaj na zdravlje građana i troškove električne energije. Broj prijavljenih havarija transformatora uzrokovanih korozivnim sumporom u Evropi do 2015. godine bio je 128, a nakon toga je zabeleženo još desetak havarija, od čega su većinom bile u pitanju havarije TRP izazvane prisustvom S₈. Procenjeno je da u Evropskoj uniji (EU) postoji oko 27000 tona transformatorskih ulja koje je starije od 30 godina. S obzirom da se u proseku izvrši regeneracija oko 30% ukupne količine ostarelih ulja, to bi značilo da u EU postoji oko 10000 tona regenerisanih ulja koja su potencijalno kontaminirani sa S₈[12-14].

Realizacija projekta podrazumeva eksperimente u laboratoriji i na pilot postrojenju, tretmanom ulja koje sadrži S₈ u koncentracijama koje se mogu naći u najvećem broju transformatora u pogonu. Nakon pilot postrojenja planirana je demonstracija nove tehnologije u operativnom okruženju, na terenu, na mobilnom postrojenju za desulfurizaciju ulja Instituta Nikola Tesla.

Razvoj GreenCleanS projekta predstavlja ključni korak ka formiranju tzv. 3PINT (eng. **three patented INT technologies**), koji predstavlja integralno rešenje za uklanjanje S₈, polihlorovanih bifenila (PCB-a), korozivnih disulfida (DBDS-a) kao i produkte starenja iz mineralnih izolacionih ulja. Implementacijom 3PINT integralnog rešenja biće omogućeno simultano uklanjanje svih neželjenih navedenih jedinjenja iz mineralnih izolacionih ulja i

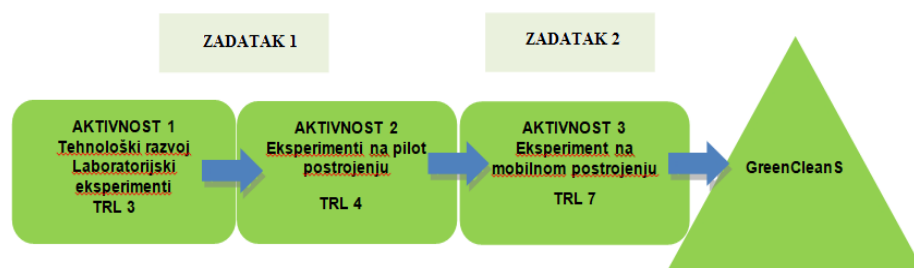
dobijanja rerafinisanih ulja visokog kvaliteta. Postupak desulfurizacije ulja u okviru GreenCleanS projekta, zajedno sa 3PINT rešenjem, biće u potpunosti usklađen sa važećim propisima i standardima iz oblasti zaštite životne sredine, pridržavajući se najboljih ekoloških praksi (eng. best environmental practice, BEP) čime se obezbeđuje veća pouzdanost rada transformatora i zaštita životne sredine.

2. Eksperimentalni okvir i razvojne faze projekta

Opšti cilj GreenCleanS projekta je unapređenje sigurnosti i održivosti elektroenergetske mreže kroz prevenciju havarija energetskih transformatora. Projekat je usmeren ka razvoju zelene tehnologije za tretman korozivnih transformatorskih ulja, čime se eliminišu operativne i ekološke opasnosti. Eksperimentalne faze projekta su strukturisane u okviru dva radna paketa, koji uključuju specifične zadatke i aktivnosti neophodne za postizanje planiranih ciljeva.

Tokom prve godine realizacije projekta eksperimentalni rad se odvijao na laboratorijskom nivou, nakon čega su tretmani ulja vršeni na pilot postrojenju (zadatak 1) radi procene efikasnosti tehnološkog postupka na mobilnom postrojenju na terenu i dostigao nivo tehnološke spremnosti 4 (Technology Readiness Level, TRL 4). Na pilot postrojenju izvršen je set eksperimenata u cilju optimizacije procesnih parametara, određivanja kinetike uklanjanja S_8 i određivanja tehnno-ekonomskih parametara procesa.

U drugoj godini projekta, optimalni procesni parametri dobijeni tretmanom ulja na pilot postrojenju biće primenjeni u cilju verifikacije tehnologije na industrijskom postrojenju za tretman ulja iz realnog transformatora (zadatak 2), čime će nivo tehnološke spremnosti biti podignut na TRL 7, i biti omogućena implementacija ove tehnologije na tržištu. Na slici 1 je prikazan grafički prikaz istraživačkog plana.



Slika 1. Istraživački plan GreenCleanS projekta

Iako se prisustvo S_8 u transformatorskim uljima povezuje sa korozijom posrebnih kontakata TRP usled velikog afiniteta molekula S_8 ka srebru sa

kojim može da reaguje i na temperaturama nižim od 60°C, osmoatomni molekul sumpora, S₈, reagovaće i sa bakrom ali na povišenim temperaturama.

Kako bi se obezbedio visok stepen desulfurizacije a izbeglo značajno podizanje temperature desulfurizacije upotrebom metala sa nižom cenom koštanja, odabrana je primena čestica bakra koji je deponovan na površini gvožđa. Sa smanjenjem veličine metala do nivoa finih čestica povećava se površina u odnosu na zapreminu što dovodi do porasta površinske energije metala, pri čemu čestice postaju reaktivnije. S obzirom da se reakcija između čestica metala i sumpora odvija na površini metala, smanjenje zapremine odnosno povećanje površine metala dovodi do ukupnog povećanja brzine reakcije.

Čestice metala su dispergovane u polietilen-glikolu (PEG) koji ima ulogu agensa za prenos faza u reakcionoj smeši, po završetku reakcije usled velike razlike u gustini ulja i PEGa dolazi do razdvajanja uljane faze od PEGa u kojem ostaju čestice metala. Primenom ovog postupka, nakon završne obrade sa adsorbentima, dobijaju se izolaciona ulja sa poboljšanim fizičko-hemijskim i električnim karakteristikama, pogodna za dalju upotrebu u energetske transformatorima, pri čemu se smanjuju potencijalni ekološki rizici kao i rizici od havarija transformatora.

U slučaju simultanog uklanjanja svih neželjenih jedinjenja (S₈, PCB-a, DBDS-a) ili njihovih kombinacija, potrebno je uskladiti radnu temperaturu reaktora sa odgovarajućim temperaturnim režimom neophodnim za uklanjanje svake komponente.

2.1. Laboratorijski eksperimenti

Laboratorijski eksperimenti (10) podrazumevali su obradu ostarelog mineralnog transformatorskog ulja koje sa oko 15 mg/kg S₈ u cilju definisanja optimalnih parametara nove tehnologije kako bi se postigla visoka efikasnost, selektivnost i dobilo nekorozivno ulje sa poboljšanim karakteristikama za dalju eksploataciju u energetske transformatorima. Tokom laboratorijskog eksperimentalnog rada varirani su glavni parametri procesa tretmana i to: temperatura, vreme kontakta, maseni odnos količine reagensa u odnosu na masu ulja i srednja molekulska masa disperzionog agensa. Utvrđeno je da sa povećanjem temperature tretmana ulja dolazi do smanjenja vremena potrebnog za potpuno uklanjanje S₈, dok sa smanjenjem srednje molekulske mase disperzionog agensa PEGa, sa PEG-400 na PEG-200 dobija ulje sa lošijim fizičko-hemijskim i električnim karakteristikama ulja nakon desulfurizacije.

Pre početka tretmana ulja, pripremljena je reagens smeša koji sadrži bakar deponovan na površini gvožđa koje je dispergovano u PEG-u. Tako pripremljenom reagensu dodato je korozivno mineralno ulje i mešano na temperaturama (≤100 °C) tokom definisanih vremenskih intervala. Intenzivnim

mešanjem ulja sa reagens smešom dolazi do efikasnog uklanjanja S₈ iz ulja, slika 2, (levo).

U određenim vremenskim intervalima tokom tretmana ulja, vršeno je uzorkovanje ulja radi praćenja promene sadržaja S₈ u ulju. Uzorci su analizirani u skladu sa standardom IEC TR 62697-3/2018 metodom gasne hromatografije sa detektorom zahvata elektrona (GC-ECD), *Agilent 7890B*. Po završetku reakcije, usled velike razlike u gustini ulja i PEGa dolazi do razdvajanja uljne faze i reagens smeše u kojoj ostaju metalne čestice. Nakon odvajanja ulja vrši se završna obrada koja obuhvata sušenje i filtriranje ulja kroz adsorbent (slika 2, desno). Komercijalno dostupan magnezijum-silikatni prirodni adsorbent, sepiolit, odabran je za završnu fazu obrade ulja. Uklanjanje eventualno zaostalih čestica metala i PEG-a u ulju predstavlja važan korak za osiguranje kvaliteta tretiranog ulja, nakon čega sledi provera fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja.

Rezultati ispitivanja karakteristika ulja pre i nakon tretmana čiji su parametri dali najbolje rezultate u laboratorijskim uslovima su prikazane u tabeli 1.



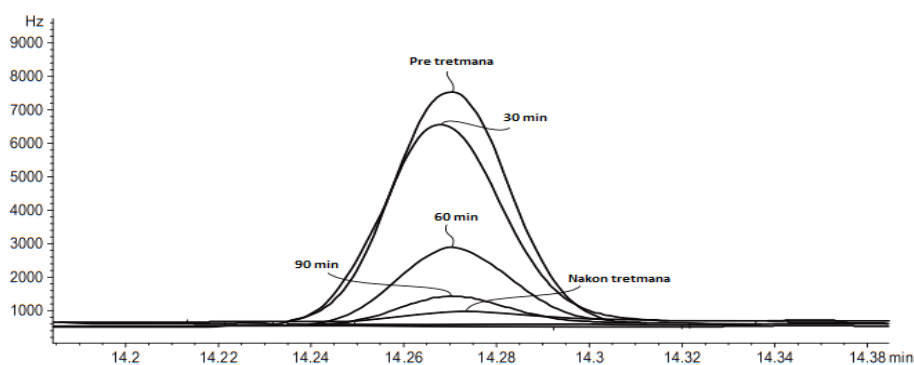
Slika 2. Ulje tokom postupka desulfurizacije (levo) i tokom završne obrade sa adsorbentom (desno)

Tabela 1. Karakteristike ulja pre i nakon tretmana u laboratorijskim uslovima

Karakteristika	Pre tretmana	Nakon tretmana
Sadržaj elementarnog sumpora (S ₈), mg/kg	15,4	Nije detektovano
Faktor dielektričnih gubitaka, na 90°C, ‰	0,011	0,0029
Neutralizacioni broj, mgKOH/g	0,05	<0,01
Međufazni napon voda/ulje, mN/m	25	38

Karakteristika	Pre tretmana	Nakon tretmana
Sadržaj inhibitora oksidacije, DBPC, %	0,25	0,21
Test korozije prema srebru	Korozivno	Nije korozivno

Na slici 3 prikazani su hromatogrami S_8 u ulju pre, tokom i nakon postupka desulfurizacije ulja, gde se jasno vidi efikasnost primenjenog procesa.



Slika 3. Hromatogram promene koncentracije S_8 u ulju pre, tokom i nakon postupka desulfurizacije ulja.

Rezultati dobijeni nakon primene inovativnog postupka na laboratorijskom nivou, pored efikasnog uklanjanja elementarnog sumpora pokazuju i značajno poboljšanje fizičko-hemijskih i električnih karakteristika ulja (Tabela 1), čime je dokazano da je reagens u potpunosti uklonjen iz ulja i nema negativan uticaj na kvalitet obrađenog ulja. Važno je istaći da se tokom postupka desulfurizacije inhibitor oksidacije DBPC-a uklanja u neznatnoj količini, te se ovaj aditiv ne mora ponovo dodavati u ulje nakon tretmana, što pozitivno utiče na cenu koštanja postupka.

Kako bi se osiguralo da nema negativnog uticaja reagens smeše na kvalitet ulja ili na integritet transformatora, nakon eksperimenata na pilot postrojenju biće izvršeno merenje broja i veličine čestica u ulju, dok će nakon eksperimenata na realnom postrojenju osim merenja broja i veličine čestica u ulju, ulje nakon tretmana biti poslato u nezavisnu laboratoriju koja će izvršiti merenje sadržaja metala u ulju.

2.2. Eksperimenti na pilot-postrojenju

Nakon uspešno završenih laboratorijskih eksperimenata proces desulfurizacije je izvršen na pilot-postrojenju.

Eksperimentalni rad na pilot postrojenju obuhvatao je tretman ostarelog mineralnog ulja u količini od 20 do 60 litara po eksperimentu sa dve različite koncentracije S_8 : viša koncentracija je iznosila 15 mg/kg S_8 , što je oko 30% iznad najviših koncentracija koje su do sada detektovane u transformatorima u pogonu, i 8 mg/kg S_8 , što predstavlja tipičnu koncentraciju u transformatorima. Eksperimenti su se izvodili na tri različite temperature sa dve pomenute koncentracije tokom definisanog vremenskog perioda, do dostizanja koncentracije S_8 manje od 0.5 mg/kg na najnižoj temperaturi.

Pilot-postrojenje se sastoji od električnog grejača na koji je postavljen sud zapremine 100 l iznad kojeg je postavljena stubna mešalica sa propelerom (Slika 4).



Slika 4. Pilot postrojenje za uklanjanje S_8 iz mineralnog izolacionog ulja

Tokom eksperimentalnog rada na pilot postrojenju definisan je optimalan vremenski period trajanja tretmana po jednom ciklusu proizvodnje – šarže, sa ciljem optimizacije cene koštanja i efikasnosti procesa. Tokom eksperimentalnog rada izvršeno je ispitivanje uslova radne sredine od strane akreditovane laboratorije, tj. količine emisije štetnih materija u okolinu (hemijska štetnost). Rezultati ispitivanja nisu pokazali prisustvo štetnih materija, dok je nivo buke bio unutar dozvoljenih granica, čime je potvrđena bezbednost radne sredine i zadovoljen uslov u pogledu usklađenosti sa važećim propisima i standardima iz oblasti zaštite životne sredine. U eksperimentu na pilot postrojenju primenjena je metodologija koja je prethodno definisana i optimizovana kroz laboratorijske eksperimente uključujući sušenje i završnu obradu ulja sa adsorbentom. U tabeli 2 su prikazane karakteristike ulja pre i nakon tretmana ulja na pilot postrojenju.

Rezultati tretmana na pilot postrojenju korišćeni su za sprovođenje osnovne analize troškova, sa ciljem određivanja optimalne količine reagensa, temperature reakcije i vremena tretmana. Detaljna analiza troškova uključila je potrošnju električne energije i troškove zbrinjavanja otpada. Kao rezultat pilot eksperimenata, postignut je nivo tehnološke spremnosti 4.

Tabela 2. Karakteristike ulja pre i nakon tretmana izabranog eksperimenta na pilot postrojenju

Karakteristika	Pre tretmana	Nakon tretmana
Sadržaj elementarnog sumpora (S_8), mg/kg	14,5	Nije detektovano
Faktor dielektričnih gubitaka, na 90°C, ‰	0,0702	0,0038
Neutralizacioni broj, mgKOH/g	0,14	0,01
Međufazni napon voda/ulje, mN/m	21	36
Broj i veličina čestica, ISO kod	/	15/12/10
Test korozije prema srebru	Korozivno	Nije korozivno

U cilju optimizacije procesa na terenu u mobilnom postrojenju izvršena je simulacija šaržnog postupka na pilot postrojenju. Određeno je da je optimalan broj šarži koje se mogu obraditi jednom reakcionom smešom šest. Stabilnost reagens smeše tokom više ciklusa tretmana obezbeđena je time što su čestice metala bile suspendovane u PEGu što je sprečilo oksidaciju bakra. Dobijeni rezultati su od ključnog značaja za smanjenje količine generisanog otpada i potrošnje hemikalija, čime se unapređuje održivost procesa i smanjuju troškovi postupka desulfurizacije.

Primena procesa desulfurizacije na pilot-postrojenju, u odnosu na laboratorijske eksperimente, rezultirala je ključnom promenom u načinu mešanja reagens smeše sa uljem. Tokom laboratorijskih eksperimenata, mešanje reagens smeše sa uljem vršeno je primenom magnetne mešalice, dok je na pilot-postrojenju korišćena stubna mešalica sa propelerom. Ova adaptacija približila je postupak realnim uslovima rada na postrojenju. Tokom eksperimenata na pilot-postrojenju, utvrđeno je da stubna mešalica postiže značajno bolje rezultate u poređenju sa laboratorijskim eksperimentima, posebno u pogledu efikasnosti uklanjanja S_8 .

2.3. Eksperimenti na postrojenju

Druga godina projekta obuhvatiće tretman ulja na terenu u INT mobilnom postrojenju za desulfurizaciju, koje će obraditi 3 tone S_8 kontaminiranog ulja zajedno sa završnom obradom ulja koje uključuje i prečišćavanje ulja filtracijom kroz adsorbent, sušenje i filtriranje. Tri tone ulja odabrane su kao reprezentativna količina ulja za demonstraciju GreenCleanS tehnologije na mobilnom postrojenju. Tretman će biti izvršen u realnom okruženju na lokaciji

jedne elektrane, kao reprezentativne lokacije za primenu nove tehnologije na uljima iz transformatora u pogonu. Na ovaj način biće potvrđena mogućnost primene date tehnologije na realnim transformatorima.

Tretman korozivnog ulja na postrojenju biće izveden primenom optimalnih procesnih parametara, prethodno definisanih na pilot postrojenju.

Tretman ulja na terenu obuhvatiće obradu 1 tone ulja sa 15 mg/kg S_8 , 1 tone ulja sa 8 mg/kg S_8 , i 1 tone koja će pored S_8 sadržati DBDS-a (u koncentraciji do 100 mg/kg) kao i PCB (između 10 i 50 mg/kg) kako bi se demonstrirala efikasnost integralnog 3PINT rešenja.

Tokom tretmana ulja na terenu u skladu sa izrađenim ESM Planom (eng. Environmental and Social Management Plan) u okviru projekta, biće izvršeno ispitivanje uticaja elektromagnetnog polja (eng. electromagnetic fields measurements, EMF) na zaposlene u operativnom okruženju postrojenja. Pored toga, biće obavljena i karakterizacija otpada, monitoring vazduha, tla i nivoa buke kako bi se osigurala usklađenost postupka sa Zakonom o zaštiti životne sredine i bezbednošću i zdravlju na radu.

Zaključak

Rezultati izvršenog eksperimentalnog istraživanja u okviru GreenCleanS projekta, prikazani u radu, potvrdili su efikasnost i primenljivost nove tehnologije desulfurizacije mineralnih izolacionih ulja. Laboratorijski eksperimenti su potvrdili da primena reagens smeše sa česticama bakra koji su deponovani na površini gvožđa, dispergovanih u polietilen-glikolu, omogućava značajno smanjenje sadržaja elementarnog sumpora (S_8) i poboljšanje fizičko-hemijskih i električnih karakteristika ulja nakon završne obrade ulja.

Eksperimenti na pilot postrojenju su potvrdili rezultate dobijene na laboratorijskom nivou, potvrđujući optimalne procesne parametre, rezultati ispitivanja radne okoline nisu pokazali emisiju štetnih materija. U narednoj fazi, primena ove tehnologije na terenu u mobilnom postrojenju predstavlja ključni korak ka industrijskoj implementaciji, sa ciljem obrade korozivnog ulja u realnim uslovima.

Integralno rešenje za uklanjanje svih prisutnih nepoželjnih jedinjenja u ulju, uključujući PCB, korozivne disulfide, S_8 i produkte starenja, 3PINT rešenje, dodatno naglašava inovativnost i održivost GreenCleanS projekta. Očekuje se da će ova tehnologija doprineti većoj pouzdanosti energetskih transformatora, smanjenju ekoloških rizika, kao i unapređenju ekonomskih aspekata procesa regeneracije ulja.

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.

Literatura

- [1] F. Holt *et al.*, "An initial study into silver corrosion in transformers following oil reclamation," *2013 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC)*, Ottawa, ON, Canada, 2013, pp. 469-472, <https://doi.org/10.1109/EIC.2013.6554290>
- [2] S. Samarasinghe, H. Ma, D. Martin and T. Saha, "Investigations of silver sulfide formation on transformer OLTC tap selectors and its influence on oil properties," in *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 26, no. 6, pp. 1926-1934, Dec. 2019, <https://doi.org/10.1109/TDEI.2019.008232>
- [3] R. Martinez, C.N. Fares, D. Vidal and C. Chiarella, "Investigating cause of failure in a 500 kV transmission transformer," *MyTransfo*, Italy, 2012, pp. 75–85
- [4] A. F. Holt *et al.*, "Silver corrosion in transformers," *2013 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, Chenzhen, China, 2013, pp. 448-451, <https://doi.org/10.1109/CEIDP.2013.6747074>
- [5] S. Samarasinghe, 2020, "Potential Mitigation Strategies to Prevent Silver Sulphide Corrosion in a Transformer OLTC" *Australian power technologies TRANSMISSION & DISTRIBUTION*, issue 5, pp 28 <https://eecs.uq.edu.au/files/7347/T%26D%20Oct-NOV%202020-our%20articles.pdf>
- [6] 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," in *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 23, no. 1, pp. 508-509, Jan. 2008, doi:: [10.1109/TPWRD.2007.911121](https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.911121)
- [7] L. Lewand, S. Reed, "Destruction of dibenzyl disulfide in transformer oil", *75th Annual International Doble Client Conference* Doble Engineering Company, 2008., https://www.doble.com/wp-content/uploads/2008-DBDS_Destruction_Lewand_and_Reed.pdf
- [8] V. Dukhi, Ajay Bissessur, and Bice S. Martincigh, "Formation of Corrosive Sulfur with Dibenzyl Disulfide in Fluid-Filled Transformer", *Industrial & Engineering Chemistry Research*, Vol 55, Issue 11, 2016, DOI: [10.1021/acs.iecr.5b04032](https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5b04032)
- [9] Cigre Working group A2.40, "Copper Sulfide long-term Mitigation and Risk Assessment," Cigre, 2015.

- [10] R. Martinez, C.N. Fares, D. Vidal and C. Chiarella, "Investigating cause of failure in a 500 kV transmission transformer," MyTransfo, Italy, 2012, pp. 75–85.
- [11] M. Dahlund,; Johansson, H.; Lager, U.; Wilson, G. "Understanding the presence of corrosive sulphur in previously non-corrosive oils following regeneration",. *Proceedings of the 77th Annual International Conference of Doble Clients Conference*, Boston, MA, USA, 26–31 March 2010.
- [12] CIGRE TB 642, „Transformer reliability survey”, 2015
- [13] CIGRE TB 378, „Copper sulphide in transformer insulation“, 2009
- [14] J.Lukic, J.Jankovic, J.Planojevic, M.Foata, C.Zieglschmid, V.Castano, A.Briotto, „Silver Sulphide in OLTCs –Root Causes and Proactive Mitigation Strategies“, *Proceedings TechCon*, Aus-NZ 2019 – Sydney, Australia

Abstract. The project funded by the Science Fund of the Republic of Serbia, Development of Green Technology to Mitigate Power Transformer Failures Induced by Elemental Sulphur and Change Current Hazardous Practice in Transformer Oil Regeneration, under the acronym GreenCleanS focuses on developing a new technology for removing elemental sulphur molecule (S_8) from mineral insulating oils used in power transformers (PT) utilization an innovative low-temperature desulfurization process. The technology development includes experimental work at the laboratory scale and pilot scale level (technology readiness level, TRL 4), as well as the demonstration of the technology in an operational environment, involving the treatment of 3 tons of oil in a mobile desulfurization unit to achieve TRL 7. The implementation of this innovative technology will contribute to reducing the number of transformer failures caused by mineral oils containing S_8 , a highly corrosive compound.

Keywords: elemental sulphur, power transformers, GreenCleanS, corrosion

Results of the GreenCleanS Project Funded by the Science Fund of the Republic of Serbia

Dejan Kolarski^{}, Jelena Lukić^{}, Valentina Vasović^{}, Jelena Janković^{}, Draginja Mihajlović^{}

Rad primljen u uredništvo: 19.11.2024. godine.

Rad prihvaćen: 18.12.2024. godine.

