

POSTUPAK ZA UKLANJANJE ELEMENTARNOG SUMPORA IZ ULJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA – SMANJENJE RIZIKA OD HAVARIJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

PROCEDURE FOR REMOVING ELEMENTAL SULFUR FROM THE OIL OF POWER TRANSFORMERS - REDUCING THE RISK OF POWER TRANSFORMERS FAILURES

Dejan KOLARSKI, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Beograd, Srbija
Valentina VASOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Beograd, Srbija
Jelena JANKOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Beograd, Srbija
Draginja MIHAJLOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Beograd, Srbija
Jovana BOŠNJAKOVIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Beograd, Srbija

KRATAK SADRŽAJ

Tokom proteklih godina zabeležen je porast broja havarija energetskih transformatora širom sveta, prouzrokovanih prisustvom korozivnih sumpornih jedinjenja u mineralnom izolacionom ulju, nastalih usled taloženja naslaga visokoprovodnih bakar-sulfida ili srebro-sulfida. U uljima koja se nalaze u eksploataciji može se detektovati veoma reaktivni elementarni sumpor, u obliku osmoatomnog molekula sumpora, S₈, koji ima izražen afinitet prema srebru, čime su najugroženiji kontakti biračkog dela teretne regulacione preklopke (TRP). Kontaminacija izolacionog ulja elementarnim sumporom posledica je visokotemperaturnog postupka reaktivacije adsorbenata tokom ili nakon postupka regeneracije mineralnih izolacionih ulja. U radu je prikazan inovativni niskotemperaturni postupak za efikasno uklanjanje S₈ iz mineralnog izolacionog ulja koji je zasnovan na primeni male količine čestica gvožđa na čijoj površini je deponovan bakar, kao ključne komponente smeše reagensa koja je dispergovana u polietilen glikolu. Intenzivnim mešanjem navedene smeše reagensa sa mineralnim izolacionim uljem pri temperaturama nižim od 100°C omogućeno je potpuno uklanjanje S₈ iz ulja. Visoka efikasnost postupka, tj. uklanjanje S₈ od početnih 15 mg/kg do nivoa ispod granice detekcije, postignuta je upotrebom male količine smeše reagensa u odnosu na masu ulja (<0,2 mas%), u laboratorijskim uslovima i na pilot postrojenju. Primenom ovog postupka i nakon završne obrade sa adsorbentima dobijaju se izolaciona ulja sa poboljšanim fizičko-hemijskim i električnim karakteristikama pogodna za dalju upotrebu u energetskim transformatorima, pri čemu se smanjuju potencijalni ekološki i ekonomski rizici od havarija energetskih transformatora. Naredni period obuhvatiće dalju optimizaciju postupka i primenu postupka na industrijskom postrojenju.

Ključne reči: elementarni sumpor, energetski transformatori, korozivan sumpor, mineralno izolaciono ulje, postupak desulfurizacije

ABSTRACT

During the past years, there has been an increase in the number of power transformer failures worldwide linked by the presence of corrosive sulfur compounds in mineral insulating oil, leading to the formation of deposits of highly conductive copper sulfide or silver sulfide. In oils in operation, a highly reactive elemental sulfur, in a form of eight atom molecule of sulfur, S₈, with a strong affinity for silver can be detected which present a significant threat to the contacts of the on load tap changer (OLTC). The high-temperature reactivation process of adsorbents during or after the regeneration process of mineral insulating oils leads to the contamination of insulating oil with elemental sulfur. The paper presents an innovative low-temperature process for the efficient removal of S₈ from mineral insulating oil, based on the application of a small amount of iron particles coated with copper on its surface as a key component of the reagent mixture which is dispersed in polyethylene glycol. Intensive mixing of the reagent mixture with mineral insulating oil at temperatures below 100°C enables the complete removal of S₈ from the oil. High process efficiency, the removal of S₈ from the initial 15 mg/kg to levels below the detection limit, is achieved by using a small amount of the reagent mixture relative to the oil mass (<0.2 wt.%), in laboratory conditions and on a pilot scale experiments. Applying this process and subsequent treatment with adsorbents, insulating oils with improved physical, chemical and electrical characteristics are obtained, suitable for further use in power transformers. This procedure reduces potential

environmental and economic risks associated with power transformer failures. The next phase will involve further process optimization and industrial plant implementation.

Key words: corrosive sulfur, desulfurization process, elemental sulfur, mineral insulating oil, power transformer

Dejan Kolarski, dejan.kolarski@ieent.org

Valentina Vasović, valentina.vasovic@ieent.org

Jelena Janković, jelena.jankovic@ieent.org

Draginja Mihajlović, draginja.mihajlovic@ieent.org

Jovana Bošnjaković, jovana.bosnjakovic@ieent.org

1. UVOD

Energetski transformatori predstavljaju ključni element u energetske mreži, njihova pouzdanost i dugotrajnost je od suštinskog značaja za stabilnost i funkcionalnost energetske mreže. Međutim, energetski transformatori su podložni brojnim faktorima rizika koji mogu ozbiljno ugroziti njihovu funkcionalnost i izazvati havarije. Ovi faktori rizika mogu proizaći iz različitih izvora i obuhvatiti širok spektar problema, a jedan od njih je pojava korozivnosti izolacionog ulja čija eksploatacija može dovesti do taloženja elektroprovodnih sulfida metala i posledične havarije transformatora. Stoga je od vitalnog značaja identifikovati problem i primeniti adekvatne korektivne mere, kako bi se osiguralo sigurno i pouzdano funkcionisanje energetske mreže. Korozivna sumporna jedinjenja, najčešće dibenzil-disulfid (DBDS), dovode do formiranja i taloženja elektroprovodnih bakara-sulfida na papirnoj izolaciji namotaja, smanjujući dielektrične osobine izolacionog sistema, pri čemu nastaju elektroprovodne staze između navojaka namotaja i dolazi do proboja čvrste izolacije namotaja, odnosno havarije transformatora. Postupcima regeneracije mineralnog izolacionog ulja adsorbentima uspešno se uklanjaju produkti starenja i DBDS, čime se produžava životni vek tečnog izolacionog dielektrika. Osim toga, ovi postupci smanjuju količinu generisanog otpadnog ulja, čime se dodatno produžava funkcionalnost energetske mreže. Međutim, tokom procesa regeneracije ulja, koji uključuje visokotemperaturni postupak reaktivacije adsorbenta (preko 600°C), može doći do formiranja elementarnog sumpora (S_8), koji ima visok afinitet da reaguje sa srebrom čak i pri veoma niskim operativnim temperaturama (ambijentalni uslovi). Reakcijom S_8 sa srebrom dolazi do formiranja visokoprovodnih naslaga srebrno-sulfida, čime su najugroženiji srebrni kontakti teretne regulacione preklapke (TRP), čak i u prisustvu niskih koncentracija S_8 u ulju, [1]. U ovom kontekstu, posebna pažnja posvećuje se postupcima uklanjanja S_8 iz ulja energetske mreže, sa ciljem smanjenja rizika od havarija i očuvanja integriteta energetske mreže. Postupci, tj. tehnike za smanjenje rizika od havarija energetske mreže, usled prisustva korozivnog sumpora, mogu se podeliti na privremene i trajne. U privremene tehnike spada dodatak pasivatora metala, koji mogu biti adekvatna zaštita srebrnih površina ukoliko je u ulju prisutan DBDS. Međutim, ova tehnika se pokazala kao neefikasna u zaštiti srebra od korozije koja potiče usled prisustva S_8 , čak i pri dodatku izuzetno visokih koncentracija pasivatora u ulje (oko 1000 mg/kg), [2]. Postupci obrade ulja adsorbentima, ili reagensima, spadaju u trajne tehnike kojima se korozivna jedinjenja sumpora trajno uklanjaju iz ulja. Konvencionalni adsorbenti koji se primenjuju za regeneraciju ulja i uklanjanje korozivnog DBDS iz mineralnog izolacionog ulja, fulerova zemlja, sepioliti i bentoniti, pokazali su se neefikasnim za uklanjanje S_8 iz ulja, [3-6]. Postupci desulfurizacije ulja primenom kompleksa kalijuma ili natrijuma sa polietilen-glikolom, (K-PEG) ili (Na-PEG), reagensi su efikasni za uklanjanje DBDS i polihlorovanih bifenila (PCB) iz ulja, dok za uklanjanje S_8 ovi postupci nisu efikasni, [7].

U cilju prevazilaženja izazova u vezi sa formiranjem S_8 tokom procesa regeneracije ulja, i smanjenja rizika od havarija energetske mreže usled prisustva S_8 u ulju, cilj istraživanja bio je razvoj inovativnog postupka koji bi efikasno uklonio S_8 iz ulja. Predloženo rešenje je u razvoju nove smeše reagensa za obradu ulja koja bi efikasno uklonila S_8 iz mineralnog izolacionog ulja na niskim temperaturama, ispod 100°C. Smeša reagensa se sastoji od čestica gvožđa na čijoj površini je deponovan bakar kao ključna komponenta reagensa, dispergovana u polietilen-glikolu (PEG). Primenom ovog postupka, nakon završne obrade sa adsorbentima, tretirano izolaciono ulje ima poboljšane fizičko-hemijske i električne karakteristike, pogodne za dalju upotrebu u energetskim transformatorima (u skladu sa Standardom IEC 60422), pri čemu se smanjuju potencijalni ekološki rizici, kao i rizici od havarija transformatora.

2. PRISUSTVO KOROZIVNOG SUMPORA U MINERALNIM ULJIMA

Ukupni sadržaj sumpora u mineralnom izolacionom ulju nalazi se u opsegu od 0,001 do 0,5%. Prisutan sumpor može biti vezan u obliku različitih jedinjenja čija se korozivnost i reaktivnost povećava po sledećem redosledu:

od stabilnih i nereaktivnih tiofena, preko reaktivnih sulfida i disulfida, veoma reaktivnih merkaptana, do najreaktivnijeg S₈, gde je izražen najveći rizik od havarije usled korozije srebra, [7]. Korozivna sumporna jedinjenja reaguju na površini metala (bakra ili srebra) formirajući naslage sulfida metala koji dovode do pregrevanja kontakata i eventualnog odvajanja naslaga provodnih čestica sulfida koja dalje mogu kontaminirati namotaje kretanjem u električnom polju i dovesti do električnih pražnjenja u aktivnom delu transformatora, [8,9]. Standardni postupci za regeneraciju mineralnog izolacionog ulja obuhvataju upotrebu reaktivnih adsorbenata u obliku sepiolita, bentonita, fullerove zemlje i boksitnih glina koji su se pokazali efikasni u uklanjanju produkata starenja i DBDS iz ulja. Ulja se pomoću pumpe filtriraju kroz kolone ispunjene adsorbentom, nakon zasićenja adsorbenta primenjuje se visokotemperaturna reaktivacija korišćenog adsorbenta kako bi se sagorele sve organske materije i adsorbent regenerisao za ponovnu upotrebu. U ovom koraku dostižu se izuzetno visoke temperature (600-900°C) koje dovode do katalitičkog krekinga ulja i formiranja S₈ koji može dospeti u proces regeneracije i kontaminirati ulje, [10]. Korozivna sumporna jedinjenja kao što su S₈, merkaptani i disulfidi mogu reagovati sa srebrnim kontaktima teretne regulacione preklopke čime nastaje visokoprovodni srebro-sulfid. Hemijske reakcije formiranja srebro-sulfida u prisustvu S₈, merkaptana i disulfida prikazane su jednačinama (1)-(3).



Pri ovome su R, R₁ i R₂ atomi ugljenika ili ugljovodoničnog ostatka molekula, dok se RSH i R₁S-R₂S odnose na merkaptane i disulfide, redom. Takođe, DBDS i merkaptani se mogu transformisati u S₈ pri visokim temperaturama koje se mogu javiti tokom parcijalnih pražnjenja, pojave električnih lukova i na vrućim tačkama unutar transformatora, [9].

2.1 Metode za detekciju korozivnih sumpornih jedinjenja

Metode ispitivanja korozivnosti ulja prema srebru mogu se podeliti na kvalitativne i kvantitativne. Kvalitativne metode za utvrđivanje korozivnosti ulja prema srebru su: DIN 51353, koji je veoma osetljiv na prisustvo S₈ u tragovima (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.). U slučaju dobijanja pozitivnog rezultata kvalitativnih testova, preporučljivo je izvršiti kvantitativne metode. Određivanje tačne koncentracije korozivnih sumpornih jedinjenja može se postići primenom nekoliko kvantitativnih, analitičkih metoda, i to: kvantitativno određivanje sadržaja DBDS u mineralnom izolacionom ulju prema IEC 62697-1 standardu, kvantitativno određivanje sadržaja S₈ u mineralnom izolacionom ulju prema IEC TR62697-3/2018 standardu, dok se sadržaj ukupnog reaktivnog sumpora određuje potenciometrijskom titracijom prema metodi CIGRE WG A2.32 – TF 03. Analizom sadržaja rastvorenih gasova u ulju mogu se detektovati povišene koncentracije termičkih gasova kvara kao posledica povećanog grejanja kontakata TRP usled naslaga srebro-sulfida, dok rezultati merenja omskih otpora mogu ukazati na porast otpora srebrnih kontakata TRP. Navedene metode pokazale su se kao izuzetno korisni dijagnostički alati za detekciju naslaga srebro sulfida na srebrnim kontaktima TRP, [11].

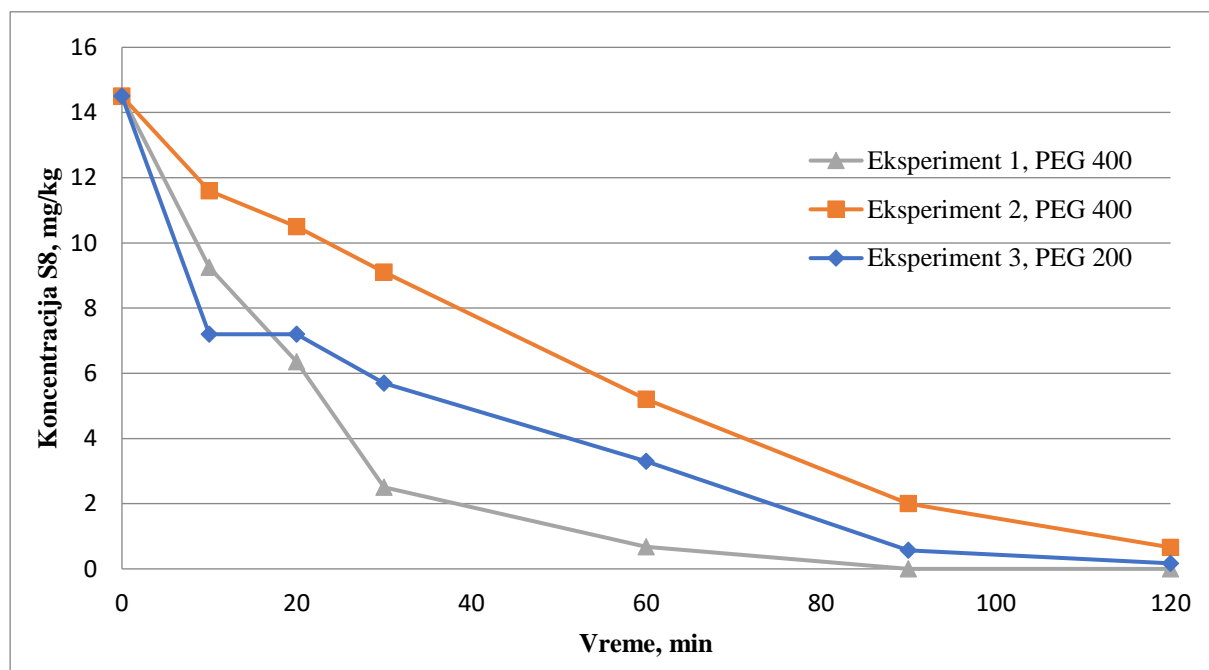
2.2 Eksperimentalan rad

Eksperimentalni rad je bio usmeren ka razvoju inovativnog postupka za efikasno uklanjanje S₈ iz mineralnog izolacionog ulja hemijskom konverzijom S₈, na niskim temperaturama, ispod 100°C. Eksperimentalan rad se sastojao od tretmana ulja na laboratorijskom nivou i u pilot postrojenju. Svi eksperimenti su izvedeni sa srednje ostarelim mineralnim izolacionim uljem iz eksploatacije, u koje je dodato približno 15 mg/kg S₈, primenom smeše reagensa polietilen-glikola sa dispergovanim gvožđem na čijoj površini je deponovan bakar. Efikasnosti razvijenog postupka za uklanjanje S₈ je praćena kvantitativnim određivanjem sadržaja S₈ pre, tokom i nakon tretmana, produktima starenja ulja, pre i nakon eksperimenata i testovima korozije na srebru, pre i nakon tretmana ulja.

2.2.1 Laboratorijski eksperimenti

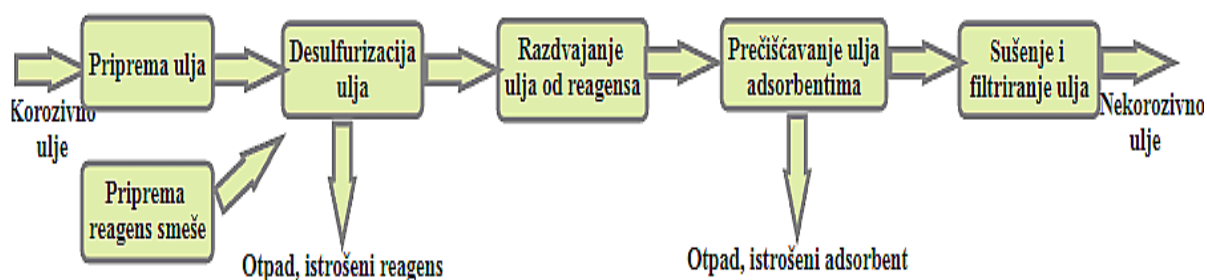
U srednje ostarelo ulje dodato je 14,5 mg/kg S₈. Pripremljena je smeša reagensa koja se sastojala od dispergovanih čestica bakra na površini gvožđa u polietilen-glikolu, koja je dodata u prethodno predgrejano pripremljeno ulje. Postupak desulfurizacije vršio se uz intenzivno mešanje reagens smeše sa uljem na temperaturama nižim od 100°C tokom 120 minuta. Maseni odnos metala u disperziji u odnosu na masu ulja u

svim ekperimentima iznosio je manje od 0,15 mas.%. U određenim vremenskim intervalima mešanje reagensa i ulja je zaustavljeno i uzeti su uzorci za praćenje promene sadržaja S_8 u ulju. Uzorci su pripremljeni u skladu sa standardom IEC TR 62697-3/2018 i analizirani na instrumentu za gasnu hromatografiju „Agilent 7890B sa detektorom zahvata elektrona (GC-ECD)“. U cilju optimizacije procesa varirana je temperatura i molekulska masa PEG. Eksperiment 1 je realizovan na temperaturi višoj za 10°C u odnosu na eksperimente 2 i 3, dok je eksperiment 3 realizovan sa polietilen-glikolom niže molekulske mase u odnosu na eksperimente 1 i 2. Na slici 1 je prikazana promena koncentracije S_8 tokom postupka desulfurizacije.



Slika 1 - Promena koncentracije elementarnog sumpora u ulju tokom postupka desulfurizacije na laboratorijskom nivou

Nakon završenog postupka desulfurizacije i potpunog uklanjanja elementarnog sumpora iz ulja (eksperimenti 1 i 3) izvršeno je odvajanje ulja od smeše reagensa, nakon čega je ulje prečišćeno adsorbentom kako bi se u potpunosti uklonile eventualno zaostale čestice reagensa. Završna faza obrade ulja obuhvatala je sušenje i filtriranje ulja. Na slici 2 prikazan je blok-dijagram postupka desulfurizacije ulja.



Slika 2 - Blok dijagram postupka desulfurizacije ulja

U tabeli 1 su prikazane fizičko-hemijske i električne karakteristike ulja pre i nakon tretmana (eksperiment 1).

Tabela 1 - Karakteristike ulja pre i nakon tretmana, eksperiment 1

Karakteristika	Pre tretmana	Nakon tretmana
Sadržaj elementarnog sumpora (S_8), IEC TR 62697-3/2018, mg/kg	14,5	n.d.
Faktor dielektričnih gubitaka, na 90°C , IEC 60247:2008	0,0702	0,0095

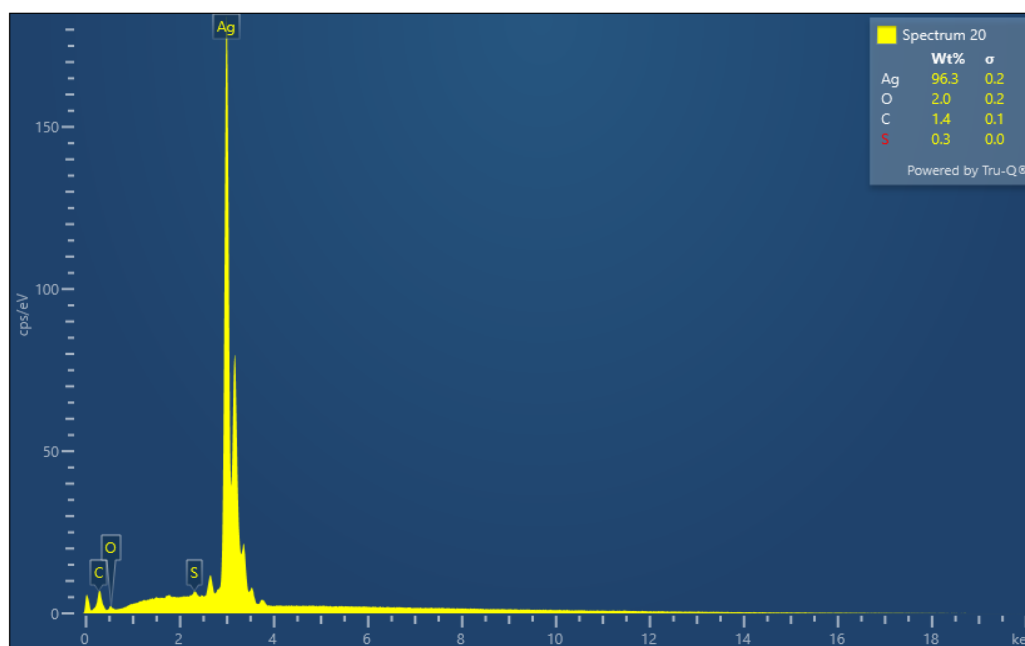
Neutralizacioni broj, IEC 62021-2:2007-05, mgKOH/g	0,14	0,01
Međufazni napon voda/ulje, ASTM D971-12, mN/m	21	40
Broj i veličina čestica u ulju, ISO kod, IEC 60970	/	10/9/7
Test korozije prema bakru, IEC 62535	Korozivno	Nije korozivno
Test korozije prema srebru, ASTM D1275-15	Korozivno	Nije korozivno
Sadržaj bakra i gvožđa u ulju, µg/kg	/	<0,01 <0,03
SEM-EDX analiza srebrne pločice nakon testa korozije prema ASTM D1275-15 standardu, wt. % sumpora na pločici	/	0,27-0,34

n.d. – nije detektovano

Na slici 3 su prikazane srebrne pločice nakon testa korozije ASTM D1275-15, na ulju pre tretmana (3a) i nakon tretmana (3b), dok je na slici 4 prikazana elementarna analiza EDS srebrne pločice nakon testa korozije (eksperiment 1).



Slika 3 - Srebrne pločice nakon testa korozije ASTM D 1275-15 na ulju pre tretmana (3a) i nakon tretmana (3b)



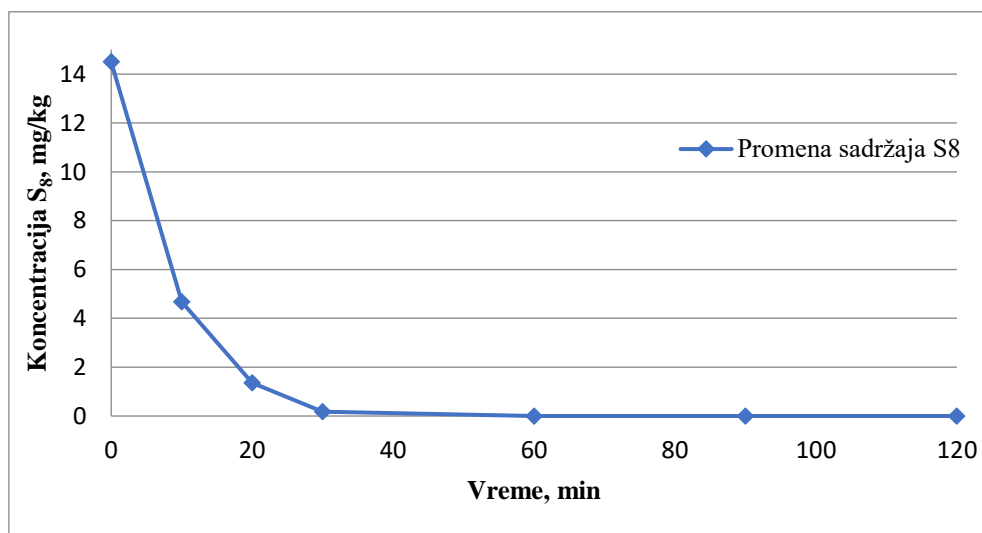
Slika 4 - Analiza EDS srebrne pločice nakon testa korozije

2.2.2 Eksperiment na pilot-postrojenju

Nakon uspešno završenih laboratorijskih eksperimenata usledili su eksperimenti na pilot-postrojenju. Pilot-postrojenje se sastoji od električnog grejača na koji je postavljen prohromski sud zapremine 100 l iznad kojeg je postavljena stubna mešalica sa prohromskim propelerom (Slika 5).

Slika 5 - Pilot postrojenje za uklanjanje S₈ iz mineralnog izolacionog ulja

U eksperimentu na pilot-postrojenju primenjeni su parametri dobijeni optimizacijom postupka kroz laboratorijske eksperimente. Eksperiment je imao za cilj da proceni praktičnu primenljivost postupka na većem sistemu, tretmanom veće količine ulja. Ulje koje je bilo predmet tretmana na pilot-postrojenju identično je ulju korišćenom u laboratorijskim eksperimentima. Postupak desulfurizacije je obuhvatao pripremu disperzije smeše reagensa u koju je dodato ulje sa sadržajem 14,5 mg/kg S₈. Tokom 120 minuta trajanja eksperimenta, ulje je intenzivno mešano na temperaturi od 95°C, pri čemu je maseni odnos metala u disperziji u odnosu na masu ulja bio manji od 0,15 mas.%. U određenim vremenskim intervalima zaustavljano je mešanje kako bi se ulje odvojilo od reagensa, i uzimani su uzorci radi praćenja promene sadržaja elementarnog sumpora u ulju (Slika 6).

Slika 6 - Promena koncentracije S₈ tokom eksperimenta na pilot-postrojenju

U tabeli 2 su prikazane fizičko-hemijske i električne karakteristike ulja pre i nakon tretmana na pilot-postrojenju dok je na slici 7 prikazan izgled srebrne pločice nakon testa korozije ASTM D 1275-15, nakon završenog tretmana ulja.

Tabela 2 - Karakteristike ulja pre i nakon tretmana na poluindustrijskom nivou

Karakteristika	Pre tretmana	Nakon tretmana
Sadržaj elementarnog sumpora (S_8), IEC TR 62697-3/2018, mg/kg	14,5	nije detektovano
Faktor dielektričnih gubitaka, na 90°C, IEC 60247:2008	0,0702	0,0038
Neutralizacioni broj, IEC 62021-2:2007-05, mgKOH/g	0,14	0,00
Međufazni napon voda/ulje, ASTM D971-12, mN/m	21	44
Broj i veličina čestica u ulju, ISO kod, IEC 60970	/	15/12/10
Test korozije prema srebru, ASTM D1275-15	Korozivno	Nije korozivno



Slika 7 - Izgled srebrne pločice nakon testa korozije ASTM D 1275-15 nakon završenog tretmana ulja na pilot-postrojenju.

3. ZAKLJUČAK

Tretman ulja smešom reagensa sastavljenom od disperzije metala gvožđa na čijoj površini je deponovan bakar u polietilen glikolu pokazala se kao veoma efikasan postupak pri uklanjanju elementarnog sumpora iz mineralnog izolacionog ulja na niskim temperaturama, ispod 100°C, čime se postiže visoka efikasnost procesa. Rezultati eksperimenata na laboratorijskom nivou i pilot-postrojenju pokazali su potpuno uklanjanje S_8 iz ulja nakon primene ovog, inovativnog postupka. Na srebrnim pločicama nakon testa korozije ASTM D 1275-15 nisu primećeni depoziti srebro-sulfida, što ukazuje da ulja nakon tretmana nisu korozivna. Primenom završne obrade ulja, značajno su poboljšane fizičko-hemijske i električne karakteristike ulja u odnosu na početne vrednosti, pre tretmana. Dobijeni rezultati ukazuju na mogućnost primene inovativnog postupka desulfurizacije kao efikasnog i održivog rešenja za uklanjanje S_8 iz mineralnog izolacionog ulja, uz produženje životnog veka energetskih transformatora. Dalje istraživanje kroz naredni eksperimentalni rad obuhvatiće dalju optimizaciju ovog postupka, i primenu na industrijskom postrojenju, na terenu.

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] 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
- [2] S. Samarasinghe, H. Ma, C. Ekanayake, D. Martin and T. Saha, 2020, "Investigating Passivator Effectiveness for Preventing Silver Sulfide Corrosion in Power Transformer On-load Tap Changers," IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, pp. 1761-1768,
- [3] CIGRE TB 625, 2015, "Copper sulphide long-term mitigation and risk assesment" <https://e-cigre.org/publication/625-copper-sulphide-longterm-mitigation-and-risk-assessment>
- [4] Matejkova M., Kastanek F., Maletserova Y., Kuzilek V., Kosanova L., Solcova O., 2017, " Removal of Corrosive Sulfur from Insulating Oils by Natural Sorbent and Liquid-Liquid Extraction", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation Vol. 24, No. 4, pp 2383

- [5] Dahlund, M. Johansson, H. Lager, U. Wilson, G., 2010, ‘‘Understanding the presence of corrosive sulphur in previously non-corrosive oils following regeneration’’ In Proceedings of the 77th Annual International Conference of Doble Clients Conference, Boston, MA, USA, pp26–31
- [6] Scatiggio, F. Tumiatti, V. Maina, R. Pompili, M. Bartnikas, R., 2010 ‘‘Corrosive Sulfur in Insulating Oils: Its Detection and Correlated Power Apparatus Failures’’ IEEE Trans. Power Deliv. 201023, pp508–509
- [7] Ding, D. Yang, L. Li, W. He, Y. Deng, B. Zhang, H. Wu, Z., 2019, ‘‘Removal of Dibenzyl Disulfide (DBDS) by Polyethylene Glycol Sodium and Its Effects on Mineral Insulating Oil’’ IEEE 7, pp 121530–121539.
- [8] Martinez, R. Fares, C.N. Vidal, D. Chiarella, C., 2012, ‘‘Investigating cause of failure in a 500 kV transmission transformer. In Proceedings of the MyTransfo’’ 75–85
- [9] Samarasinghe, S. Ma, H. Martin, D. Saha, T., 2019, ‘‘Investigations of Silver Sulfide Formation on Transformer OLTC Tap Selectors and Its Influence on Oil Properties, IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul. 26, 1926–1933.
- [10] Holt A., Facciotti M., Amaro P., Brown P., Lewin L., Pilgrim J., 2013, ‘An initial studz into silver corrosion on transformers following oil reclamation’ pp 469-472
- [11] Lukić J., Janković J., Radomirović J., Mihajlović D., Ivančević V., Milosavljević S., 2017, ‘Silver Corrosion Mitigation – Solution for Extension of Transformer Life’ Proceedings of Techcon South Eaast Asia.