

REGENERACIJA OSTARELIH TRANSFORMATORSKIH ULJA DOMAĆIM SORBENTIMA U CILJU PRODUŽENJA ŽIVOTNOG VEKA TRANSFORMATORA

J.JANKOVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

K.DRAKIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

V.VASOVIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

J.LUKIĆ, Elektrotehnički institut „Nikola Tesla“, Srbija

J.PLANOJEVIĆ, Proces projekt inženjering, Srbija

Đ. JANAČKOVIĆ, Univerzitet u Beogradu Tehnološko-Metalurški fakultet, Srbija

Đ.VELJOVIĆ, Univerzitet u Beogradu Tehnološko-Metalurški fakultet, Srbija

UVOD

Jedan od postupaka revitalizacije energetskih transformatora čine procesi regeneracije pogonski ostarelih izolacionih ulja, koji u praksi najčešće podrazumevaju i postupke sušenja i temeljnog ispiranja čvrste izolacije toplim, regenerisanim uljem. Proces regeneracije mineralnih transformatorskih ulja primenom adsorbenata, široko su primenjeni u poboljšanju karakteristika pogonski ostarelih ulja iz eksploatacije u cilju njihovog ponovnog stavljanja u upotrebu u električnoj opremi. Teži se primeni materijala (prirodnih i sintetičkih) koji imaju visoku moć adsorpcije, dobru selektivnost, mogućnost reaktivacije, da bi bili zadovoljeni ekonomski i ekološki kriterijumi. Da bi se regenerisana ulja ponovo koristila u električnoj opremi moraju biti zadovoljeni odgovarajući kriterijumi kvaliteta u skladu sa standardima IEC 60296 i IEC 60422. Osobine adsorbenata se u zavisnosti od primene mogu modifikovati, a sam proces kontrolisati primenom različitih temperatura i pritisaka za postizanje optimalnih rezultata u procesu adsorpcije. Postupci regeneracije ulja se najčešće izvode perkolacionim postupkom na povišenim temperaturama. Perkolacioni postupak se sastoji u propuštanju ulja kroz sloj adsorbenta u kontrolisanim uslovima (najčešće na povišenoj temperaturi i sniženom pritisku). Obrada ulja može se izvoditi dok je transformator pod naponom, odnosno „on line“ kao i „off line“ tehnika koja podrazumeva proces sa isključenjem transformatora.

PROCENA STANJA I UPOTREBLJIVOSTI ULJA U EKSPLOATACIJI

Kriterijumi za procenu stanja i kvaliteta ulja iz eksploatacije definisani su na osnovu višegodišnjeg iskustva i u skladu sa standardom IEC 60422, na osnovu kojih se ulja svrstavaju u 3 grupe kvaliteta, A (dobro, eng. „good“), B (zadovoljava, eng. „fair“), C (loše, eng. „poor“). [1] Tokom eksploatacije dolazi do starenja ulja, što dovodi do pogoršanja karakteristika ulja. Da bi se obezbedilo adekvatno praćenje procesa degradacije ulja, a samim tim i određivanje adekvatne funkcije i pogonskog rizika preporučuje se redovno, periodično ispitivanje osnovnih funkcionalnih osobina ulja, kao što su probojni napon (U_p), faktor dielektričnih gubitaka ($tg\delta$), specifična električna otpornost (ρ), neutralizacioni broj (N_b), međupovršinski napon (σ) i dr. [2] Redovnim ispitivanjem vrednosti karakteristika ulja kao i poređenjem sa prethodno izmerenim vrednostima, može da se utvrdi brzina promena vrednosti tih karakteristika. Na osnovu ovih promena može se proceniti budući radni vek transformatorskog ulja i planirati potrebna intervencija na ulju transformatora. Ukoliko su rezultati ispitivanja

jedne ili više karakteristika ulja transformatora iz pogona nezadovoljavajući i kada se proceni da je pravi trenutak za revitalizaciju, predlažu se mere koje treba preduzeti za sanaciju stanja transformatorskog ulja i ukupnog izolacionog sistema transformatora. [3]

REGENERACIJA ULJA I REVITALIZACIJA ČVRSTE IZOLACIJE

Regeneracija ulja obuhvata postupke uklanjanja produkata starenja i vode iz ulja. Najčešće primenjeni postupci se zasnivaju na adsorbiciji jedinjenja koje je potrebno ukloniti iz ulja, prolaskom ulja kroz nepokretan sloj adsorbenta – perkolacioni postupak pod dejstvom vakuuma. U primeni su različiti adsorbenti i procesni uslovi: radna temperatura, brzine protoka, pritisak. Kapacitet adsorbenta za adsorbiciju hidrofilnih ili hidrofobnih komponenti iz ulja i vode zavisi pored hemijske strukture, morfologije adsorbenta i od temperature. Regeneracija ulja uz istovremeno sušenje i ispiranje čvrste izolacije, toplim regenerisanim uljem je posebno značajan deo procesa u cilju postizanja dobrih dugoročnih efekata revitalizacije IS. Značajna količina produkata starenja adsorbovana je u čvrstoj izolaciji i veoma je važno temeljno ispirati i osušiti čvrstu izolaciju, te se nakon tog postupka može očekivati poboljšanje dielektričnih osobina (otpori izolacije, faktor dielektričnih gubitaka i indeksi polarizacije) i usporeno starenje čvrste izolacije. Optimizacija procesnih parametara: maseni udeo adsorbenta, temperatura i vreme kontakta (broj ciklusa) vrši se laboratorijskim ispitivanjima pre izvođenja postupka na terenu. Tokom regeneracije, određena količina inhibitora oksidacije se uklanja, pa ih je potrebno naknadno dodati ulju u odgovarajućoj količini, pre nego što se regenerisano ulje stavi u eksploataciju, kako bi regenerisano ulje imalo što duži radni vek. [3] Ispitivanjem karakteristika ulja prema standardu IEC 60422, pre i nakon hemijske regeneracije u laboratoriji može se proceniti efikasnost postupka, dok se budući radni vek regenerisanog ulja određuje ispitivanjem oksidacione stabilnosti regenerisanog ulja prema metodi IEC 61125 B. [4] U radu je dat opis perkolacionog postupka regeneracije odabranih ulja domaćim adsorbentom sepiolitom („Sorb Ultra“), u laboratorijskim uslovima i na terenu. Sepiolit poseduje veliku poroznost i veliku specifičnu površinu, što ga čini adekvatnim za datu primenu.

KRITERIJUMI KVALITETA REGENERISANIH ULJA

Regenerisana ulja treba da imaju karakteristike sličnim karakteristikama novih ulja, koje pripadaju A grupi kvaliteta. U praksi su zabeleženi slučajevi regenerisanih ulja, koja dve godine nakon procesa regeneracije i dalje imaju karakteristike novih ulja. Ključni parametar za ocenu kvaliteta regenerisanih ulja je oksidaciona stabilnost ulja (tj. indukcion period, IP). Određivanje indukcionog perioda (vreme potrebno da se iz ulja razvije isparljiva kiselost koja odgovara neutralizacionom broju od 0,28mg KOH/g ulja) je od izuzetne važnosti, u cilju utvrđivanja otpornosti ulja na procese starenja tokom eksploatacije i procene budućeg radnog veka regenerisanog ulja. Određivanje oksidacione stabilnosti regenerisanog ulja (IP) se vrši u skladu sa standardom SRPS EN 61125/2010 (metoda B). Kada je polazno ulje iz kojeg se dobija regenerat bilo jako ostarelo sa visokim faktorom dielektričnih gubitaka i visokim sadržajem kiselina, uglavnom se dešava da se kvalitet dobijenog regenerata, tj. njegova oksidaciona stabilnost (IP) ne može izjednačiti sa kvalitetom, tj. oksidacionom stabilnošću polaznog novog ulja. Ovo može biti posebno izraženo zbog resorpcije produkata starenja iz papira u regenerisano ulje.

LABORATORIJSKA ISPITIVANJA REGENERATIVNE SPOSOBNOSTI ULJA

Pre nego što se donese odluka o regeneraciji ulja transformatora na terenu, neophodno je izvršiti laboratorijsko ispitivanje uzorka ulja, u cilju utvrđivanja stanja i kvaliteta ulja i njegove regenerativne sposobnosti. Utvrđivanje regenerativne sposobnosti ulja podrazumeva i utvrđivanje potrebne količine adsorbenta, optimalne temperature i broja prolaza, kao i provera karakteristika regenerisanog ulja pre i nakon regeneracije pri zadatim parametrima procesa, kako bi proces regeneracije ulja na terenu bio adekvatno izvršen. [3] Ukoliko je regenerativna sposobnost ulja zadovoljavajuća, sa datim tehnološkim parametrima se vrši regeneracija ulja na terenu.

Opis laboratorijskog eksperimenta

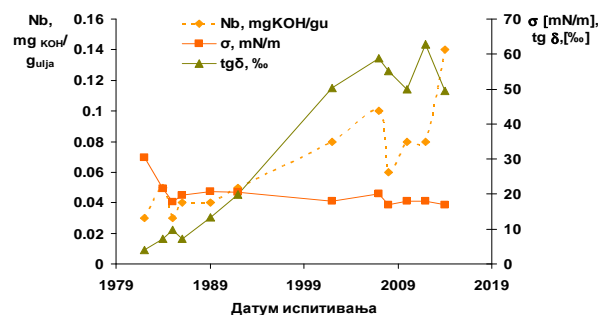
U cilju optimizacije postupka radi dobijanja visokog kvaliteta obrađenog ulja, urađene su laboratorijske probe jednostepenog, dvostepenog i trostepenog perkolacionog postupka regeneracije ulja transformatora manjeg (T1)

i većeg stepena ostarelosti (T2), na optimalnoj temperaturi od 60-65°C, sa različitim brojem prolaza i različitom količinom adsorbenta u svakom stepenu. Zagrejano ulje je propuštanu kroz kolonu sa slojem adsorbenta uz kontrolisanu brzinu protoka i temperature ulja. Za regeneraciju transformatorskih ulja korišćen je domaći adsorbent sepiolit („Sorb Ultra“), koji je prethodno žaren 2h na 150°C i čuvan u eksikatoru, radi sprečavanja kontaminacije atmosferskom vlagom. Nakon izvršene regeneracije, ulja su inhibirana sa 0.35-0.40 mas.% DBPC (2,6 di-terc butil para krezol). Uporedna analiza efikasnosti procesa regeneracije ulja izvršena je ispitivanjem osnovnih funkcionalnih karakteristika ulja (Nb, σ , tg δ , Tp, IP).

Laboratorijska regeneracija ulja transformatora T1 (ulje manjeg stepena ostarelosti)

Na Slici 1. prikazane su početne karakteristike odabranog ulja za regeneraciju kao i promena glavnih parametara starenja ulja transformatora T1 (kategorija opreme A), tokom celokupnog perioda eksploatacije.

Ulje T1	Pre regeneracije	Kriterijum, ocena C
DBPC, %m	nema	<30% poč. vrednosti
Nb, mgKOH/g _u	0,13	>0,15
σ , mN/m	18	<20
tg δ , ‰	43,4	>150
ρ , G Ω m	6,3	<1
Tp, °C	151	Max. sniženje od 10%



Slika 1. Početne karakteristike ulja i promena fizičko-hemijskih karakteristika ulja tokom eksploatacije transformatora T1

U cilju utvrđivanja optimalnih uslova regeneracije odnosno postignutog efekta primenjenog procesa za ulje transformatora T1, u Tabelama 1 i 2 uporedno su prikazane razlike u dobijenom kvalitetu ulja za jednostepeni, dvostepeni i trostepeni postupak, sa istim ukupnim brojem prolaza 12 (tab.1), odnosno 16 (tab.2) i istom ukupnom količinom adsorbenta, 12% u odnosu na masu ulja.

Tabela 1. Zbirni prikaz karakteristika ulja nakon jednostepenog, dvostepenog i trostepenog postupka sa sumom prolaza 12

Ulje transformatora T1	DBPC,%m	Nb, mgKOH/g _u	σ , mN/m	tg δ , ‰	ρ , G Ω m	Tp, °C	IP, h
I, 12 prolaza, 12% ads.	0,38*	0,00	45	1,7	752,2	154	294
II, 12 prolaza, 12% ads.	0,37*	0,00	46	1,6	652,5	152	292
III, 12 prolaza, 12% ads.	0,38*	0,00	40	4,8	285,1	152	226

Tabela 2. Zbirni prikaz karakteristika ulja nakon jednostepenog, dvostepenog i trostepenog postupka sa sumom prolaza 16 (15)

Ulje transformatora T1	DBPC,%m	Nb, mgKOH/g _u	σ , mN/m	tg δ , ‰	ρ , G Ω m	Tp, °C	IP, h
I, 16 prolaza, 12% ads.	0,38*	0,00	46	0,9	661,2	153	282
II, 16 prolaza, 12% ads.	0,38*	0,00	49	0,7	871,6	153	338
III, 15 prolaza, 12% ads.	0,37*	0,00	44	4,4	320,2	152	307

*-naknadno dodat inhibitor

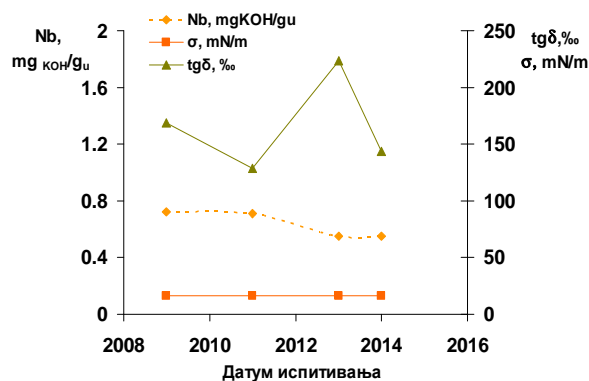
Poređenjem rezultata karakteristika ulja T1, nakon regeneracije sepiolitom, uočava se da su, za ulje manjeg stepena ostarelosti, primenjeni postupci u visokoj meri efikasni u uklanjanju produkata starenja iz ulja kao i da je

najveći efekat regeneracije ulja postignut u dvostepenom postupku sa 16 prolaza ulja kroz sloj adsorbenta. Indukcioni periodi kod svih regenerata su izuzetno visoki i ukazuju na relativno dug budući radni vek ulja u pogonu.

Laboratorijska regeneracija ulja transformatora T2 (ulje većeg stepena ostarelosti)

Na Slici 2. prikazane su početne karakteristike odabranog ulja za regeneraciju kao i promena glavnih parametara starenja ulja transformatora T2 (kategorija opreme C), tokom celokupnog perioda eksploatacije.

Ulje T2	Pre regeneracije	Kriterijum, ocena C
DBPC, %m	0.02	<30% poč. vrednosti
Nb, mgKOH/g _u	0.64	>0,30
σ, mN/m	15	<18
tgδ, ‰	138.2	>200
ρ, GΩm	1.5	<0.2
T _p , °C	139	Max. sniženje od 10%



Slika 2. Početne karakteristike ulja i promena fizičko-hemijskih karakteristika ulja tokom eksploatacije transformatora T2

U cilju utvrđivanja efikasnosti primenjenih procesa regeneracije ulja variranjem ključnih procesnih parametara, u tabelama 3 i 4 prikazane su razlike u dobijenom kvalitetu ulja za jednostepeni, dvostepeni i trostepeni postupak sa sličnim ukupnim brojem prolaza 8, odnosno 9 (tab. 3) i 16, odnosno 15 (tab. 4) i istom ukupnom količinom adsorbenta, 20% (21%) u odnosu na masu ulja.

Tabela 3. Zbirni prikaz karakteristika ulja nakon jednostepenog, dvostepenog i trostepenog postupka sa sumom prolaza 8 (9)

Ulje transformatora T2	DBPC,%m	Nb, mgKOH/g _u	σ, mN/m	tgδ, ‰	ρ, GΩm	T _p , °C	IP, h
I, 8 prolaza, 20% ads.	0,37*	0,04	32	4,2	157,8	144	33
II, 8 prolaza, 20% ads.	0,36*	0,03	36	4,7	164,4	144	43
III, 9 prolaza, 21% ads.	0,37*	0,05	30	15,0	73,4	143	34

Tabela 4. Zbirni prikaz karakteristika ulja nakon jednostepenog, dvostepenog i trostepenog postupka sa sumom prolaza 16 (15)

Ulje transformatora T2	DBPC,%m	Nb, mgKOH/g _u	σ, mN/m	tgδ, ‰	ρ, GΩm	T _p , °C	IP, h
I, 16 prolaza, 20% ads.	0,38*	0,02	37	4,8	72,4	143	39
II, 16 prolaza, 20% ads.	0,38*	0,02	38	3,1	86,6	142	44
III, 15 prolaza, 21% ads.	0,38*	0,02	38	1,9	268,4	143	47

*-naknadno dodat inhibitor DBPC

Analizom rezultata, može se zaključiti da je primenjenim postupcima regeneracije sepiolitom značajno popravljen kvalitet ulja u odnosu na početne vrednosti fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja kao i da je najveći efekat regeneracije postignut u trostepenom postupku sa ukupnim brojem prolaza 15 (3 puta po 5 prolaza ulja kroz svežu količinu adsorbenta). Međutim, indukcioni period (IP) je i dalje nizak, što ukazuje na mnogo kraći budući radni vek u odnosu na novo ulje. Kratak indukcioni period je posledica veće količine produkata degradacije zaostalih u ulju a koji se postupkom regeneracije ne mogu ukloniti iz ulja, što znači da je postupak regeneracije primenjen kasno, kada je regenerativna sposobnost ulja mala.

Analiza rezultata laboratorijske optimizacije regeneracije ulja

Razmatranjem rezultata primenjenih postupaka regeneracije ulja u laboratorijskim uslovima, zaključeno je da je optimalan proces regeneracije, jednostepeni postupak sa 12 prolaza, na temperaturi od 60-65 °C i to: za ulje umerenog stepena ostarelosti (T1) maseni odnos adsorbent/ulje - 12% dok je za ulje većeg stepena ostarelosti (T2) maseni odnos adsorbent/ulje - 20%. Prednost jednostepenog postupka ogleda se u jednostavnijem operativnom radu, bez potrebe za izmenom adsorbenta, a dobijeni efekti regeneracije su jednako dobri kao i kod dvostepenog i trostepenog postupka.

REGENERACIJA ULJA NA TERENU

Na osnovu rezultata laboratorijske optimizacije regeneracije ulja, izvršena je regeneracija mešavine otpadnog ulja na terenu, u količini od oko 600 kg. Na osnovu rezultata fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika mešavine ulja (tabela 5), doneta je odluka da je ulje pogodno za regeneraciju. Razmatranjem rezultata izmerenih karakteristika ulja dobijenih nakon laboratorijske optimizacije regeneracije, odlučeno je da se regeneracija ulja na terenu izvrši jednostepenim postupkom sa ukupnim brojem prolaza 12 i 20% adsorbenta u odnosu na masu ulja.

Tabela 5. Početne karakteristike mešavine ulja za regeneraciju

Mešavina otpadnog ulja	DBPC, %m	Nb, mg _{KOH} /g _u	σ , mN/m	tg δ , ‰	ρ , G Ω m	Tp, °C	ρ_{20} , g/cm ³	IP, h
Početne karakteristike	0.09	0.41	17	70.0	2.8	128	0,877	33

Opis postupka za regeneraciju transformatorskog ulja na terenu

Mešavina otpadnog ulja u količini od oko 600 kg se, uz pomoć pumpe, uvodila u postrojenje za regeneraciju (uređaj za degazaciju, dehidraciju i mikronsku filtraciju vezano sa kolonama za adsorpciju) i zagrevalo do željene temperature (60-65°C), uz konstantno izdvajanje vode vakuumiranjem. U obe kolone za regeneraciju ulja cilindričnog oblika (d = 36 cm, H = 110 cm) je nasuto po 10 mas % adsorbenta sepiolita (ukupno 20 mas %), kolone su vakuumirane nakon čega je, pomoću pumpe, omogućena cirkulacija ulja kroz kolone sa adsorbentom, kao i kontinualno zagrevanje ulja. Pritisak, temperatura i protok ulja se održavao u koloni na zadatim vrednostima kako bi se obezbedila maksimalna efikasnost procesa. Tokom regeneracije, u cilju adekvatnog praćenja procesa, izvršeno je uzorkovanje ulja nakon 6, 8 i 12 prolaza, radi ispitivanja karakteristika ulja. U skladu sa rezultatima dobijenih karakteristika ulja tokom regeneracije (tab.6), koji, zbog rada na otvorenom i atmosferskog vlaženja adsorbenta i ulja, nisu bili zadovoljavajući, odlučeno je da se doda nova količina adsorbenta od 7%, kao i da se proces produži za još 4 prolaza, tako da su finalni rezultati regeneracije ulja dobijeni dvostepenim postupkom sa ukupnim brojem prolaza 16 (12+4 prolaza) i količinom adsorbenta (20% + 7%) u odnosu na masu ulja. Na kraju procesa izvršena je završna obrada ulja (sušenje, filtriranje i degazacija) i na kraju dodatak inhibitora oksidacije ulja, DBPC.

Rezultati laboratorijskog ispitivanja svojstava regenerisanog ulja na terenu

U Tabeli 6. prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja karakteristika ulja tokom i nakon regeneracije na terenu.

Tabela 6. Uporedni prikaz rezultata karakteristika ulja tokom i nakon regeneracije na terenu sa sumom prolaza 16

Mešavina otpadnog ulja	DBPC,%m	Nb, mgkOH/g _a	σ, mN/m	tgδ, ‰	ρ, GΩm	ρ ₂₀ , g/cm ³	IP, h
Nakon 6 prolaza	/	0,01	40	7,0	87,3	0,875	66
Nakon 8 prolaza	/	0,01	40	4,6	115,6	0,875	99
Nakon 12 prolaza, posle filtriranja i dodatka DBPC	0,31/ 0,39*	0,01	40	8,2	51,8	0,875	100
Nakon 12+4 prolaza, posle filtriranja i dodatka DBPC (20+7% adsorbenta)	0,31/ 0,39*	0,01	46	2,3	263,7	0,875	196
ZAHTEVANE VREDNOSTI	≤0,40	≤0,01	/	≤5,0	/	≤0,895	≥120

* pre stavljanja na indukcioni period, ulje je laboratorijski doinhibirano do 0,39% DBPC i osušeno

Na slici 4. su prikazani uzorci transformatorskog ulja pre i nakon regeneracije na terenu.



Slika 4. Transformatorsko ulje pre (desno) i nakon (levo) regeneracije

Analiza rezultata procesa regeneracije ulja na terenu

Na osnovu rezultata ispitivanja karakteristika ulja, pre i nakon regeneracije na terenu, može se zaključiti da je postignut visok nivo efikasnosti primenjenog procesa. Ispitane karakteristike ulja su u značajnoj meri poboljšanje i dobijeno je regenerisano ulje sa zadovoljavajućim vrednostima svih karakteristika. (tab. 6) Nakon završne obrade ulja (sušenje i filtriranje), ulje je imalo visoku i zadovoljavajuću vrednost dielektrične čvrstoće. Dužina indukcionog perioda je značajno iznad minimalne propisane vrednosti što upućuje na dugačak eksploatacioni vek regenerisanog ulja.

TEHNOEKONOMSKA ANALIZA

U ovom radu, prikazana je tehnoekonomska analiza dve tehnologije: zamena ulja novim uljem i regeneracija ulja uz ispiranje i opciono sušenje čvrste izolacije. Cene za određene procese i neophodne operacije su prikazane u evrima (€) po kg izolacionog fluida (ulja). Treba naglasiti da cene, koje su prikazane u daljem tekstu, nisu komercijalne već su određene zbirom procenjenih troškova i na osnovu ponuda dobijenih za pojedine komponente koje su potrebne za realizaciju pomenute tehnologije. [3]

Analiza troškova zamene ulja

Proces podrazumeva zamenu postojećeg transformatorskog ulja novim uljem. U zavisnosti od ovlaženosti novog ulja i celulozne izolacije transformatora, dat je okvirni prikaz troškova za tri vrste procesa:

1. Zamena ulja bez sušenja novog transformatorskog ulja
2. Zamena ulja sa sušenjem novog transformatorskog ulja
3. Zamena ulja sa sušenjem i ispiranjem celulozne izolacije transformatora

Cene procesa su date po kilogramu ulja i obuhvataju: nabavku novog ulja, troškove transporta, angažovanje mašine i amortizaciju opreme, kao i radnu snagu za izvođenje procesa.

Analiza troškova procesa regeneracije ulja

Kao što smo već napomenuli, pre nego što se donese odluka o regeneraciji ulja transformatora na terenu, neophodno je izvršiti laboratorijsko ispitivanje uzorka ulja, u cilju utvrđivanja stanja i kvaliteta ulja kao i njegove regenerativne sposobnosti. S obzirom da, tokom procesa regeneracije ulja na terenu, dolazi do određenog gubitka ulja od oko 5-8%, potrebno je izgublenu količinu ulja nadoknaditi dolivanjem novog ulja. Za potrebe tehnokonomске analize dat je okvirni prikaz troškova tri vrste procesa regeneracije ulja:

1. Regeneracija otpadnog ulja bez sušenja i ispiranja celulozne izolacije – jednostepeni postupak sa 12 prolaza (sa 12% i 20% adsorbenta)
2. Regeneracija ulja uz sušenje i ispiranje celulozne izolacije – jednostepeni postupak sa 12 prolaza (12% i 20% adsorbenta)
3. Regeneracija ulja uz sušenje i ispiranje celulozne izolacije – trostepeni postupak sa 3 prolaza (21% adsorbenta)

Uporedna analiza troškova primenjenih tehnika i odabir najoptimalnije metode

U tabelama 7, 8 i 9 prikazane su komparativne cene izvođenja metoda, date po kilogramu ulja, po različitim veličinama transformatora i to: za transformator veličine 8 MVA, 35 kV, 5 t ulja (tab. 7), za transformator veličine 31,5 MVA, 110 kV, 18 t ulja (tab. 8) i za transformator veličine 360 MVA, 410 kV, 55 t ulja (tab. 9).

Tabela 7. Uporedni prikaz cena zamene i regeneracije ulja sa sušenjem i ispiranjem celulozne izolacije, za transformator veličine 8 MVA, 35 kV, 5 t ulja

	Zamena ulja			Regeneracija, jednostepeni postupak, 12 prolaza		Regeneracija, trostepeni postupak, 3 prolaza
	1 prolaz	2 prolaza	3 prolaza	12% ads.	20% ads.	21% ads.
Cena, €/kg ulja	2,28	2,35	2,42	1,9-2,2	2,1-2,3	1,8-2,0

Tabela 8. Uporedni prikaz cena zamene i regeneracije ulja sa sušenjem i ispiranjem celulozne izolacije, za transformator veličine 31,5MVA, 110 kV, 18 t ulja

	Zamena ulja			Regeneracija, jednostepeni postupak, 12 prolaza		Regeneracija, trostepeni postupak, 3 prolaza
	1 prolaz	2 prolaza	3 prolaza	12% ads.	20% ads.	21% ads.
Cena, €/kg ulja	2,19	2,27	2,35	1,1-1,8	1,3-2,0	1,1-2,0

Tabela 9. Uporedni prikaz cena zamene i regeneracije ulja sa sušenjem i ispiranjem celulozne izolacije, za transformator veličine 360MVA, 410 kV, 55 t ulja

	Zamena ulja			Regeneracija, jednostepeni postupak, 12 prolaza		Regeneracija, trostepeni postupak, 3 prolaza
	1 prolaz	2 prolaza	3 prolaza	12% ads.	20% ads.	21% ads.
Cena, €/kg ulja	2,08	2,10	2,12	0,8-1,1	0,9-1,1	0,8-1,1

Sa ekonomskog aspekta, poređenjem metoda obrade ulja, metoda zamene ulja pokazala se kao veoma skupa, zbog visoke tržišne cene novih ulja, posebno kod transformatora najvećih snaga i naponskog nivoa, sa najvećim količinama ulja. Ipak, treba napomenuti da su cene nafte i ulja trenutno u padu, a komercijalna cena novog ulja može dosta da varira, zavisno od ponuđača i količina ulja koje se kupuju (od 1.5 Eur/kg do 2.5 Eur/kg). Stoga je, za analizu troškova zamene ulja, uzeta trenutna srednja cena novog ulja, dobijena na osnovu ponuda različitih proizvođača. [3] Pronalaženje alternativnog rešenja, odnosno primena procesa regeneracije ostarelog ulja adsorbentima pokazalo se ekonomski i tehnički opravdanim u odnosu na zamenu ulja, posebno za transformatore

većih snaga (31,5 i 360 MVA) a samim tim i veće količine ulja. Jednostepeni postupak regeneracije sa 12% adsorbenta je najpovoljniji, ali njegova primenljivost i efikasnost je zadovoljavajuća za ulja srednjeg stepena ostarelosti. Primena postupka regeneracije ulja višestepenim korišćenjem adsorbenta se pokazala kao ekonomski najpovoljnija. Ukoliko se regeneracija i inhibiranje ulja kombinuju sa sušenjem i višestrukim ispiranjem aktivnog dela transformatora toplim regenerisanim uljem, koje ima osobinu da bolje rastvara produkte starenja nego novo ulje, može se postići visok nivo sušenja i ispiranja celokupnog izolacionog sistema transformatora, tj. revitalizacija čvrste izolacije transformatora, što je potvrđeno u praksi. [4,5].

ZAKLJUČAK

Tokom eksploatacije transformatora dolazi do postepenog pogoršanja karakteristika izolacionog ulja, stoga je od izuzetne važnosti vršiti redovnu periodičnu kontrolu u laboratoriji, kako bi se utvrdila brzina promena vrednosti karakteristika, procenio budući radni vek ulja i pravovremeno donela odluka o primeni odgovarajuće korektivne mere. Procesima regeneracije ulja adsorbentima iz ostarelog ulja se uklanjaju produkti starenja a kao rezultat dobijaju se ulja sa karakteristikama u klasi kvaliteta novih ulja. Rezultati laboratorijske optimizacije regeneracije ulja perkolacionim postupkom, primenom domaćeg sorbenta sepiolita, na odabranim uljima transformatora T1 i T2, pokazali su visoku efikasnost sepiolita u uklanjanju produkata starenja iz ulja, kao i da se jednako dobri rezultati regeneracije ulja postižu jednostepenim perkolacionim postupkom sa 12 prolaza i to: 12% adsorbenta (za ulje manjeg stepena ostarelosti T1), dok je za ulje većeg stepena ostarelosti (T2) 20% adsorbenta u odnosu na masu ulja. Analizom rezultata nakon regeneracije mešavine otpadnih ulja na terenu, zaključeno je da je, primenom domaćeg sorbenta sepiolita postignut visok efekat regeneracije i dobijeno je ulje čije karakteristike zadovoljavaju kriterijum kvaliteta novih ulja. Na osnovu tehnokonomске analize potvrđena je ekonomska opravdanost procesa regeneracije ulja u odnosu na zamenu ulja, posebno za transformatore većih snaga (31,5 i 360 MVA) sa većim količinama ulja. Regeneracija ulja višestepenim korišćenjem adsorbenta se pokazala kao ekonomski najpovoljnija. Ukoliko se uzme u obzir da se višestepenim korišćenjem adsorbenta postiže i bolje ispiranje aktivnog dela transformatora od ostataka starog ulja i efikasniji proces sušenja papirne izolacije transformatora (u tri umesto u jednom prolazu), sagledava se i tehnička opravdanost ovakve obrade izolacionog sistema transformatora.

LITERATURA

- [1] IEC 60422, Ed.4.0: „Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance“, 2013.
- [2] Interni standard „Ispitivanje izolacionih ulja“ EPS, 2012
- [3] Studija: „Sprečavanje posledica udesnih situacija u transformatorskim postrojenjima JP EPS i regeneracija za ponovno korišćenje mineralnih transformatorskih ulja primenom domaćeg sorbenta i tehnologije“ EPS, 2015
- [4] 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.
- [5] J.Lukić, S. Teslić, K. Drakić, S. Daković, S. Milosavljević, R. Đukanović: “ Insulation reconditioning and oil reclamation proces applied in transformer life managemant” CIGRE Romania, 2007
- [6] CIGRE Brochure 413: “Insulating Oil Regeneration and Dehalogenation”, April 2010.
- [7] J.Lukić, K.Drakić, V.Radin, V.Ivančević: “Usporedna analiza efekata regeneracije korišćenih transformatorskih ulja primenom prirodnih i sintetičkih adsorbenata na bazi alumo-silikata, Zbornik radova INT, 2005.
- [8] Sudija: „Poboljšanje kvaliteta transformatorskih ulja iz eksploatacije hemijskom obradom“, Elektrotehnički Institut Nikola Tesla, Beograd 1984