KSENIJA R. ĐURĐEVIĆ[1]
MIRJANA VOJINOVIĆ–MILORADOV[2]
SLOBODAN M. SOKOLOVIĆ[3]

[1]NIS a.d., NIS Petrol, Rafinerija nafte OD, Rafinerija nafte, Novi Sad

[2]Fakultet tehničkih nauka, Univerziteta u Novom Sadu, Departman za inženjerstvo zaštite životne sredine, Novi Sad

[3]Tehnološki fakultet, Univerziteta u Novom Sadu, Novi Sad

STRUČNI RAD

621.314.212:621.892:66.097.38

ŽIVOTNI CIKLUS TRANSFORMATORSKIH ULJA

Potrošnja električne energije se stalno povećava zbog rasta populacije i industrijalizacije, što rezultira u mnogo oštrijim uslovima rada transformatora, najvažnijeg uređaja sistema za prenos i distribuciju električne energije. Većina transformatora u svetu je već prevazišla projektovani vek trajanja, tako da je povećanje pouzdanosti i produžetak životnog veka, osnovni zadatak u upravljanju životnim ciklusom transformatora. Dodatne i ne manje važne funkcije transformatorskog ulja su dijagnostičke. Iz tih razloga predmet istraživanja ovog rada su dve faze životnog ciklusa transformatorskog ulja: proaktivno održavanje i praćenje transformatorskih ulja u toku upotrebe sa osvrtom na uticaj stanja ulja na stanje papirne izolacije i samog transformatora, i regeneracija transformatorskih ulja u cilju produženja upotrebe i mogućnosti revitalizacije papirne izolacije prečišćavanjem ulja. U radu su istaknute prednosti revitalizacije uljno–papirne izolacije u odnosu na zamenu ulja.

U svakom sistemu proizvodnje i prenosa električne energije najvažnija briga je pouzdanost. Transformatori nisu samo velika investicija, nego su ključni u održavanju kontinuiteta snabdevanja električnom energijom. Kvarovi transformatora mogu uzrokovati velike štete na uređajima sa kojima su povezani i zbog toga je neophodno da se održavaju u radnom stanju i zaštite od eventualnih uticaja koji mogu dovesti do kvara. Nažalost izolacija u transformatoru se vremenom degradira, što može izazvati kvar uređaja. Zbog toga je neophodno razviti precizni monitoring stanja sistema, da bi se ustanovilo stanje uređaja i predvidelo kad bi moglo da dođe do kvara. Većina kvarova transformatora (oko 85%) nastaje zbog otkazivanja izolacionog sistema.

U današnje vreme ulaganje kapitala u nove transformatore i zamenu starih transformatora je na vrlo niskom nivou. Situacija se pogoršava jer su transformatori sve više opterećeni. Povećanje iskorišćenosti uređaja, smanjena kapitalna ulaganja i smanjenje troškova održavanja predstavljaju izazov za vlasnike transformatora, koji počinju da razvijaju sopstveni program "Upravljanja životnim ciklusom transformatora".

Većina energetskih transformatora u svetu je u funkciji više od 30 godina. Uzimajući tu činjenicu u obzir jasno je da su neophodne nove ideje za produženje preostalog veka uz ekonomsku opravdanost. Sistemi praćenja i tretmana, razvijeni za nove transformatore nisu primenljivi za stare, tako da se razvila ideja o "gerijatriji transformatora" [1].

Osnovni cilj je da se razvije sistem upravljanja životnim ciklusom transformatora, koji će ispuniti sledeće zahteve:

– održati transformatore, koji ubrzo treba da se zamene (zbog degradacije izolacionog sistema) u bezbednom i pouzdanom stanju,

– smanjiti brzinu starenja transformatora, koji su u prihvatljivom stanju da bi još duže vreme mogli da budu u upotrebi,

– ublažiti ciklus reinvestiranja da bi se smanjili "pikovi" zamene uređaja iste starosti i stepena degradacije,

– dati jasnu i pouzdanu sliku aktuelnog stanja transformatora, da bi se njihovim vlasnicima dalo dovoljno podataka za pravilno odlučivanje,

– poboljšati situaciju snabdevanja, koja je posebno u slučaju transformatora specijalne namene ograničena kapacitetima proizvođača.

Navedeni sistem predstavlja sistem upravljanja koji koordinira svim odlukama vezanim za transformator, a koje doprinose ostvarenju ciljeva kao što su: pouzdanost u radu, bolje iskorišćenje, smanjenje troškova održavanja, optimizacija rada itd.

Transformatorsko ulje (TU) koje u transformatoru obezbeđuje izolaciju, hlađenje, pomaže pri gašenju varnice i rastvara gasove koji nastaju pri degradaciji ulja, najčešće je mineralnog, dok može da bude i sintetičkog i biljnog porekla. Osim ovih funkcija TU rastvara vlagu i gasove iz celulozne izolacije, gasove i vlagu iz atmosfere kojoj je ulje izloženo. Do nedavno, prirodni estri, fluidi na bazi ulja od biljnog semena, nisu bili pogodni za upotrebu u transformatorima zbog lošijih niskotemperaturnih karakteristika i manje oksidacione stabilnosti. Međutim, razvojem aditiva i stabilizatora postiglo se da transformatorska ulja biljnog porekla postaju konkurentna mineralnim i sintetičkim TU, [2]. Od 1997., TU biljnog porekla nalaze komercijalnu primenu, a novim tehnološkim postupcima uz modifikaciju hemijske strukture i upotrebom genetski modifikovane soje kao sirovine, lošija oksidaciona stabilnost više ne predstavlja problem [3–5]. Potpuna biodegradabilnost i visoka tačka palje-

Adresa autora: K. Đurđević, NIS Petrol, Šajkaškog odreda 4, Novi Sad
E-mail: Ksenija.Djurdjevic@rns–nis.co.yu
Rad primljen: Jul 11, 2007.
Rad prihvaćen: Novembar 30, 2007.

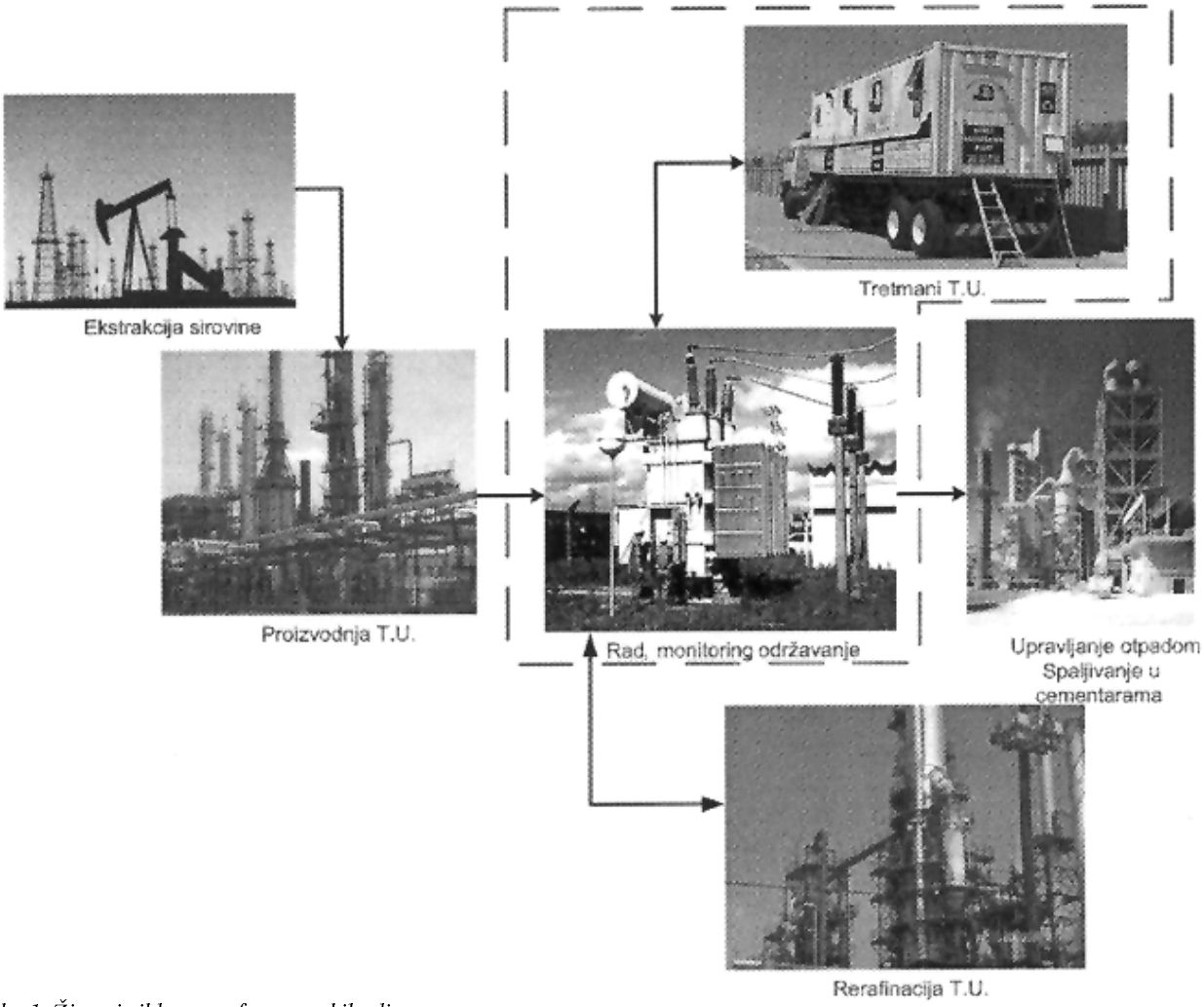
nja TU biljnog porekla su prednosti u odnosu na mineralna. Prirodni estri mogu da zadrže veću količinu vode od konvencionalnih mineralnih ulja što sprečava prelaz vode u celuloznu izolaciju, odnosno hidrolizu celuloze. Jedna od vrlo važnih prednosti ovih ulja je da apsorbuju vlagu iz papirne izolacije, te se preporučuju u slučajevima zamene ulja ili dopune, jer suše papirnu izolaciju. TU biljnog porekla, prema ispitivanju Cooper Power Systems, mogu da produže radni vek papirne izolacije 5–8 puta [6]. Uzimajući u obzir da su iskustva potvrdila raniju konstataciju da se ispitivanjem TU dobija oko 70% informacija na osnovu kojih se procenjuje stanje transformatora [7], osim navedenih funkcija TU ima veoma važnu ulogu u dijagnostici, te se upravljanjem životnim ciklusom ulja (LCM) indirektno utiče na radni vek transformatora.

Stanje izolacije transformatora prati se ispitivanjem ulja i ispitivanjem papirne izolacije, pri čemu ispitivanje ulja ne uslovljava zastoj u radu transformatora, za razliku od ispitivanja čvrste izolacije. Međutim, ispitivanjem ulja, merenjem koncentracije furanskih jedinjenja, vlage itd., indirektno se određuje i stanje papirne izolacije. Po mnogim autorima, kraj životnog veka transformatora nastaje kada dođe do razgradnje papira, depolimerizacije pod uticajem vlage, povišene temperature i proizvoda oksidacije TU. Održavanjem TU postupcima sušenja, prečišćavanja i regeneracije štiti se i produžava vek papirne izolacije. Transformatorsko ulje može da se ispituje instrumentima instalisanim na transformatoru i laboratorijski.

ŽIVOTNI CIKLUS TRANSFORMATORSKOG ULJA

Životni ciklus mineralnih transformatorskih ulja, prikazan na slici 1, sastoji se iz sledećih šest faza:

1. Ekstrakcija sirovine – nafta
2. Proizvodnja transformatorskih ulja
3. a) Upotreba transformatorskih ulja (rad transformatora)
   b) Kontrola u primeni (Monitoring)
4. Sušenje, filtracija, regeneracija



Slika 1. Životni ciklus transformatorskih ulja
Figure 1. Transformer oil life cycle

5. Rerafinacija

6. Upravljanje otpadom (odlaganje otpadnog ulja / spaljivanje npr.u cementarama)

U praksi, životni ciklus TU mogu da čine samo četiri faze (1, 2, 3 i 6) i da se nakon degradacije uljno–papirne izolacije ulje, zameni novim TU. Međutim, sve više se primenjuju tretmani, tj. faze 4 i 5, naročito u zemljama sa strožijim propisima iz oblasti zaštite životne sredine.

Od svih faza životnog ciklusa transformatorskog ulja najduže traje faza upotrebe. U toku upotrebe, ispituju se karakteristike ulja i kada transformatorsko ulje izgubi neophodna svojstva za pravilan rad transformatora, neophodni su tretmani. Procesi sušenja, filtracije i/ili regeneracije ulja (revitalizacija) mogu vratiti kvalitet ulja na nivo kvaliteta novog ulja, revitalizovati papirnu izolaciju i produžiti životni vek TU, kao i samog transformatora. Blagovremenom regeneracijom transformatorsko ulje ne mora da dođe u fazu otpadnog ulja. Ukoliko se regeneracija ne sprovodi blagovremeno i ona ne dovede do kvaliteta novog ulja na ekonomičan način, pristupa se postupku rerafinacije. Ukoliko je rerafinacija neizvodljiva bilo iz tehnoloških ili ekonomskih razloga transformatorsko ulje postaje otpadno ulje koje se ili spaljuje u cementarama ili odlaže.

ISPITIVANJE ULJA

Ispitivanja TU u primeni se sprovode u cilju:

– klasifikacije/utvrđivanja stanja ulja

– dijagnostikovanja stanja papirne izolacije i

– dijagnostikovanja nepravilnosti u radu transformatora.

Za dijagnostikovanje stanja izolacije i uljne i papirne primenjuju se Smernice za nadzor i održavanje mineralnih izolacionih ulja u električnim uređajima, standard IEC 60422 Ed. 3 – 2005. ili IEEE American National Standard (ANSI) C57.106. Po navedenim smernicama ispituju se fizičke–hemijske karakteristike (neutralizacioni broj, međupovršinski napon, sadržaj vode, sadržaj inhibitora oksidacije, broj i veličina čestica, metali u ulju, dielektrična čvrstoća, faktor gubitaka, tg δ) koje ukazuju na stanje tečnog dielektrika [8].

Ulja u primeni se klasifikuju u tri grupe: **dobro, upotrebljivo i loše**.

Preporučene granične vrednosti za osnovne karakteristike koje se određuju za transformatorska ulja u primeni po standardima IEC 60422 i IEEE American National Standard (ANSI) **C57.106**, prikazane su u tabeli 1.

Kriterijumi za kiselinski broj i međupovršinski napon su strožiji kod ANSI/IEEE standarda i preporučuje se tretman pri nižim vrednostima kiselinskog broja i višim vrednostima međupovršinskog napona.

Tabela 1. Preporučene granične vrednosti za osnovne karakteristike TU
Table 1. Recommended limit values for TU basic properties

IEC 60422 – za naponski nivo, kV	< 72,5	72,5–170	> 170
Kiselinski broj, mgKOH/g	0,3	0,2	0,15
Dielektrična čvrstoća,kV/cm	120	160	200
Međupovršinski napon, mN/m	22	22	22
tg δ x 10^3	0,2	0,1	0,1
ANSI/IEEE C57.106 – za naponski nivo, kV	≤69	69–230	≤230
Kiselinski broj, mgKOH/g	0,2	0,15	0,1
Međupovršinski napon, mN/m	25	30	32

Analize kojima se dijagnostifikuje stanje papirne izolacije su: analiza furana (stepen depolimerizacije papira), gasna analiza i sadržaj vode u ulju (indirektno se određuje u papirnoj izolaciji).

Informacije o nepravilnostima u radu transformatora i stanju izolacionog sistema dobijaju se gasnom analizom (dissolved gas analysis (DGA)) IEC 60567 i ASTM D3612, dok su uputstva za interpretaciju, standardi IEC 60599 i IEEE C57.104.

Postoji još niz savremenih metoda za gasnu analizu i interpretacije rezultata gasne analize, a jedan od novijih pristupa je primena veštačke intelegencije, najčešće, tehnika zasnovana na neuronskim mrežama [9]. Druge tehnike su ekspertni sistemi, rasplinuta (fuzzy) logika i multivarijantna regresija, kao i kombinovane tehnike. Primena veštačke inteligencije bazirana je na standardu IEC 60599 i dugogodišnjem iskustvu i može da pomogne prevazilaženju nedostataka konvencionalnih metoda za dijagnozu kvara kod problema "nema odluke", kao i poboljšanju preciznosti [10].

U poslednje vreme u primeni ima sve više uređaja kojima se navedene karakteristike kontrolišu on–line, najčešće sadržaj vlage i gasna analiza [11].

TRETMANI TRANSFORMATORSKOG ULJA

Postupci koji se primenjuju za tretman transformatorskog ulja su: sušenje, degazacija, filtracija, elektrostatička filtracija, regeneracija adsorbensima i drugi. Najčešće se primenjuje kombinacija više postupaka, a izbor tretmana zavisi od stanja izolacije u transformatoru.

Rekondicioniranje je fizički proces kojim se uklanja ili smanjuje količina fizičkih kontaminanata i obuhvata: filtraciju, uklanjanje vlage, degazaciju itd. [12]. U praksi se događa da se rekondicioniranjem ne postiže kvalitet preporučen kod novih uređaja, te je potrebno primeniti dodatne tretmane. Nekim od navedenih postupaka istovremeno se regeneriše i transformatorsko ulje i papirna izolacija, kao na primer tretman toplim uljem. Uobičajen naziv za postupke pri kojim se regeneriše i ulje i papirna izolacija je re-

vitalizacija. Po vrsti tehnoloških postupaka kao i po rasprostranjenosti primene, tretmani TU mogu se podeliti na četiri osnovne kategorije:

– Prečišćavanje

– Regeneracija/Revitalizacija (prečišavanje + regeneracija)

– Rerafinacija

– Dekontaminacija ulja koja sadrže polihlorovane bifenile(PCB).

Regeneracija/Revitalizacija

Regeneracija TU je potrebna kada kvalitet transformatorskog ulja opadne na nivo gde nije moguće prečišćavanjem dobiti željeni kvalitet. Za regeneraciju se koriste adsorbensi kao što je Fulerova zemlja, zeoliti, aktivna glina itd. Ovakav pristup u zaštiti uljno/papirne izolacije se tradicionalno primenjuje i poznat je pod imenom korektivan pristup. Preventivan pristup je kontinualno (on–line) prečišćavanje uljno/papirne izolacije.

Prednosti kontinualnog prečišćavanja su:

– uklanjanje proizvoda degradacije izolacije u momentu nastajanja, što sprečava sakupljanje degradacionih proizvoda do nivoa koji oštećuje izolaciju,

– zaustavljanje/usporavanje procesa starenja izolacije održavanjem koncentracije vlage na niskom nivou,

– smanjenje autokatalitičkih reakcija oksidacije i hidrolize,

– poboljšanje migracije adsorbovanih proizvoda iz papira u ulje održavanjem dinamičke ravnoteže između dve faze [13].

Pri korektivnom pristupu regeneracija se obično sprovodi u više ciklusa da bi ulje zadovoljilo zahteve u pogledu kvaliteta i da bi se uklonili svi kontaminanti koji su adsorbovani na celulozi, te se takvom regeneracijom revitalizuje ceo sistem uljno–papirne izolacije.

Izbor adsorbensa i tehnologije zavisi od više faktora, kao što su kvalitet ulja, vrsta procesa korektivan/preventivan, ekonomskih parametara i dr. U cilju uklanjanja vlage i proizvoda razgradnje i ulja i papira, primenjena su dva pristupa u izboru adsorbensa [9]:

1. Kombinacija jakog sredstva za sušenje koji uklanja samo vodu i hidrofilnog adsorbensa, koji uklanja polarne materije (kiseline i drugi proizvodi oksidacije) metale i ostale proizvode razgradnje iz osušenog ulja.

2. Hidrofobni adsorbens sa velikim adsorpcionim kapacitetom za uklanjanje proizvoda degradacije sa malim afinitetom prema vodi.

Važan faktor pri izboru adsorbensa, osim aktivnosti, jeste i mogućnost regeneracije adsorbensa, jer se u tom slučaju pri postupku revitalizacije ne stvara otpad.

Koliko je važno ulje ponovo vratiti u upotrebu pokazuje uvođenje i mobilnog postrojenja za rerafinaciju TU [14].

PREDNOSTI REVITALIZACIJE ULJNO PAPIRNE IZOLACIJE U ODNOSU NA ZAMENU TRANSFORMATORSKIH ULJA

Kada kvalitet TU opadne i ulje se tretira, bilo da je u pitanju regeneracija, revitalizacija ili rerafinacija, neophodno je istaći razlike između novog i tretiranog ulja. Razlike se mogu kategorisati kao tehničke, ekonomske i vezane za zaštitu životne sredine. U tehničkom smislu, ako se posmatra samo kvalitet ulja, razlike su veoma male, jer se teži da tretirana ulja zadovolje specifikaciju IEC 60296. U postupku revitalizacije, koja se sprovodi na terenu, dolazi do prečišćavanja i transformatorskog ulja i papirne izolacije, dok se zamenom ulja neznatno ukloni talog sa papirne izolacije, te je očigledna prednost revitalizacije [15]. Ekonomski pokazatelji se dobiju kada se porede troškovi proizvodnje novog ulja sa troškovima tretmana. Uzimajući u obzir niže troškove regeneracije u odnosu na troškove proizvodnje transformatorskog ulja (eksploatacija nafte, transport, rafinacija), smatra se da je u proseku cena regenerisanog ulja 30% [16] manja od cene novog TU, a u slučaju da se ulje regeneriše na mestu eksploatacije, cena regenerisanog ulja može da bude i do 1/3 cene novog ulja. Cena nekorišćenog ulja je podložna promenama na tržištu vezanim za cenu nafte, kao i drugim nepredvidim faktorima. Osim toga, transformatorsko ulje se ne proizvodi u svim zemljama, tako da faktor uvoza za mnoge zemlje predstvalja ekonomski disbalans.

Prednosti tretmana transformatorskog ulja u odnosu na zamenu u pogledu zaštite životne sredine su značajne i to su:

– Minimizacija otpada

– Konzervacija

– Potrošnja energije.

Na osnovu Evropskog kataloga otpada EWC 2002 (European Waste Catalogue) i Liste opasnog otpada, upotrebljena transformatorska ulja su svrstana u klasu opasnog otpada koji zahteva posebne mere odlaganja. Vlasnik transformatora ima obavezu upravljanja otpadom. Imajući u vidu značajne količine transformatorskog ulja u transformatoru, upravljanja otpadom je veoma ozbiljan zadatak, naročito kada se uzmu u obzir sadašnji i predstojeći propisi vezani za upravljanje otpadom [17,18]. Uzimajući u obzir da su aspekti i uticaji neuporedivo veći pri proizvodnji nego pri tretmanu TU (npr. globalno zagrevanje, potrošnja neobnovljivih resursa), vlasnik transformatora primenjujući tretmane, doprinosi održivom razvoju i produženju životnog veka transformatorskog ulja. Ukoliko se primenjuje adsorbens

Tabela 2. Rangiranje upravljanja otpadom – transformatorsko ulje (TU)
Table 2. Waste management ranking – transformer oil

Rangiranje upravljanja otpadom		Mogućnosti	Razmatrane aktivnosti
1	Najbolje rešenje	Sprečavanje nastajanja otpadnog TU	Smanjenje izvora produženjem "života" TU (monitoring, rekondicioniranje i regeneracija)
2	↓	Ponovno korišćenje	Regeneracija Rerafinacija
3		Povraćaj energije sagorevanjem	Sagorevanje korišćenih ulja i iskorišćenje toplotne energije
4	Najgore rešenje	Odlaganje otpadnog ulja	Sakupljanje ulja i pravilno odlaganje

koji je ekonomski isplativo regenerisati, što je slučaj sa sintetičkim adsorbensima, u kompletnom postupku regeneracije izdvajaju se samo ugljen dioksid i voda, i to pri regeneraciji adsorbensa, tako da zbrinjavanje adsorbensa nakon regeneracije (opasan otpad) ne predstavlja problem.

Poznato je da su rezerve nafte ograničen i neobnovljiv resurs. To znači da upravljanje, odnosno potrošnja nafte treba da bude pažljivo vođeno, jer svaka regeneracija smanjuje potrošnju iste količine nafte. Energija koja se potroši za dobijanje nekorišćenog ulja obuhvata: energiju istraživanja, ekstrakcije nafte, transport do rafinerije, rafinaciju, transport do korisnika i ona je mnogo veća od energije koja se utroši pri tretmanu TU, naročito ako se tretman sprovodi na mestu eksploatacije.

Mogućnost i ekonomska opravdanost višekratne regeneracije ulja zavisi od stepena "starosti" izolacije. Ukoliko je u većoj meri došlo do razgradnje papirne izolacije regeneracijom ulja se ne postižu željeni rezultati. Zato monitoring i pravovremeni tretmani mogu da stvore uslove za teorijski neograničen broj regeneracija ulja sa "nula otpada".

EKSPERIMENTALNI DEO

Laboratorijska ispitivanja

Laboratorijski su ispitana ulja iz dva transformatora različite "starosti" koji su u radu, da bi se na osnovu fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika utvrdilo da li je ulje zadovoljavajućeg kvaliteta ili je potrebna regeneracija. Glavni kriterijum za odlučivanje bile su vrednosti kiselinskog broja i međupovršinskog napona i sadržaj inhibitora oksidacije. Prema standardu IEC 60422 za oba ulja iz transformatora (tabele 4 i 5) preporučuje se regeneracija jer je inhibitor oksidacije utrošen, neutralizacioni broj je veći od 0,06 mgKOH/g ulja, a međupovršinski napon je manji od 30 mN/m. Kod uzorka 2 analizom vrednosti neutralizacionog broja (tabela 5) vidi se da dolazi do naglog povećanja od poslednjeg ispitivanja, tri godine unazad. Od vrednosti 0,01 mgKOH/g ulja (maksimalna vrednost za nova ulja) do vrednosti 0,1 mgKOH/g ulja proteklo je 34 godine, dok je za tri poslednje godine vrednost porasla za 0,08, što je još jedan razlog za regeneraciju pre nego što počne izdvajanje taloga. U oba slučaja odluka je bila da se ulja regenerišu.

Za regeneraciju u laboratorijskim uslovima korišćen je sintetički adsorbens koji je pored prirodnog silicijskog kristalobalitskog TUF–a, u upotrebi kod nas.

Transformatorska ulja regenerisana su sintetičkim adsorbensom alumo–silikatnog tipa, čije su karakteristike prikazani u tabeli 3. U oba slučaja regeneracije, primenjen je kontaktni postupak sa 15% adsorbensa i vremenom kontakta 72 sata. Nakon regeneracije uzorci su inhibirani 2,6–ditercijarnim butil para krezolom (DBPC), antioksidansom, uobičajenim za transformatorska ulja. U oba slučaja dodat je i pasivizator koji smanjuje katalitičko dejstvo metala i zaustavlja reakciju korozivnog sumpora sa metalima.

Tabela 3. Karakteristike sintetičkog adsorbensa [19]
Table 3. Synthetic adsorbent properties [19]

Redni broj	Karakteristika	Vrednost
1	Specifična površina, m^2/g	150–240
2	Srednji prečnik pora, Å	50–80
3	Ukupna zapremina pora, cm^3	0,4
4	Statički sorpcioni kapacitet vode, %	24
5	Statički sorpcioni kapacitet alifatičnih ugljovodonika, %	13,5
6	Statički sorpcioni kapacitet furana i homolognih jedinjenja, %	11
7	Oblik adsorbensa, sferni, mm	0,5–1,5

Uzorak 1 uzet je iz transformatora prenosnog odnosa: 21/0,71 kV, snage 6,5 MVA, količina ulja: 3,45 t, u pogonu: od 1985. godine. U tabeli 4 prikazane su karakteristike TU pre i posle regeneracije. Postupkom regeneracije, inhibitor koji se nalazio u tragu, izmerena vrednost 0,06 %m/m, je uklonjen odn. koncentracija je bila van opsega primene metode (0,05–5 %m/m), te se ulje nakon regeneracije tretira kao neinhibirano. Za ispitivanje oksidacione stabilnosti primenjene različite dužine trajanja testa prema metodi IEC 61125 (metoda C).

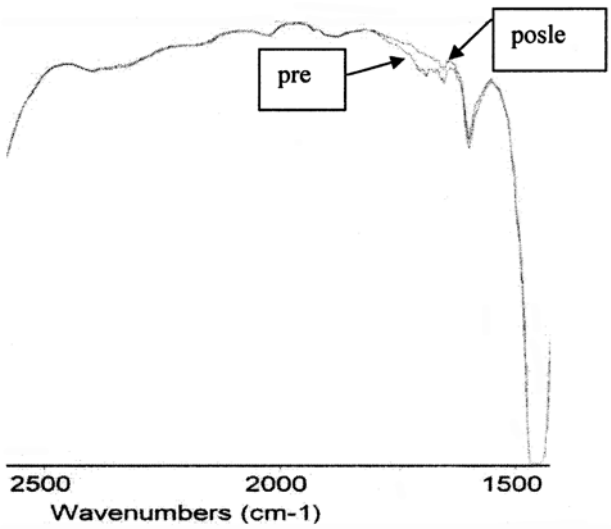
Na slici 2 prikazan je infracrveni spektrogram uzorka 1 pre i posle regeneracije.

Uzorak 2 uzet je iz transformatora prenosnog odnosa: 110/35/10 kV, količina ulja: 17 t, u pogonu: od. 1969 god. U tabeli 5 date su fizičke, hemijske i

Tabela 4. Rezultati regeneracija uzorka 1
Table 4. Sample 1 regeneration results.

Karakteristike	Pre regeneracije	Nakon regeneracije	Nakon regeneracije + 0,3% DBPC	Nakon regeneracije + 0,3% DBPC + 26 mg/kg pasivizatora metala
Dielektična čvrstoća, KV/cm		>250		
Inhibitor, %m/m	0,06	< 0,04		
Talog u n–heptanu, kval / %m/m		Nema		
Neutralizacioni broj, mgKOH/g	0,17	0,012		
Boja	6	3,5		
Tačka paljenja, ^{o}C		157		
Međupovršinski napon, mN/m	20	35		
tg δ x 10^3	64,3	6,73		
Oksidaciona stabilnost(1)				
Vreme oksidacije	2 x 164 h	164 h	500 h	500 h
Ukupna kiselost mg KOH/g	0,51	0,26	0,69	0,37
Isparljiva	0,05	0,02	0,19	0,17
Rastvorljiva	0,46	0,24	0,5	0,2
Talog %	0,31	0,11	0,22	0,05
tg δ x 10^3	60	63		
Policiklični aromatični ugljovodonici (PCA), %m/m	1,73	1,53		
Čestice, ISO 4406/99	23/20/15	22/19/13		

(1)Oksidaciona stabilnost IEC 61125 (metoda C)
Trajanje testa: (U) Neinhibirana ulja: 164 h; (T) U tragu inhibirana ulja: 332 h; (I) Inhibirana ulja: 500 h.



Slika 2. Proizvodi oksidacije pre i posle regeneracije uzorka 1 (IR spektrogram)
Figure 2. Oxidation products prior to and after regeneration (IR spectrogram)

električne karakteristike ulja (uzorak 2) pre i nakon regeneracije.

Regeneracijom sa 22% adsorbensa, na infracrvenom spektru u oblasti gde se javljaju proizvodi oksidacije, ektinkcija je 0, što je potvrđeno određivanjem neutralizacionog broja, koji iznosi 0,01 mg KOH/g, kao kod novih ulja. Oksidaciona stabilnost je znatno ispod granice za nova ulja (ukupna kiselost – najviše 1,2 mg KOH/g; talog – najviše 0,8%, prema IEC 60296). Uzimajući u obzir da je transformator u radu već 37 godina i troškove regeneracije, karakteristike dobijene regeneracijom sa 15 % adsorbensa su zadovoljavajuće. Gasna analiza prema Duval–ovom trouglu ukazuje na termički kvar, > 700°C. Međutim, dijagnoza prema Divalovom trouglu uvek ukazuje na neki kvar te ne predstavlja jedini pokazatelj koji ukazuje na mogući kvar transformatora. Koncentracije pojedinačnih gasova kvara, ukupna količina gasova i trend povećanja koncentracije gasova, uzimajući u obzir i starost transformatora ne ukazuju na kvar. Na osnovu rezultata ispitivanja infracrvenom spektrometrijom i kod uzorka 1 i kod uzorka 2 pokazalo se da se merenjem ekstinkcije u oblasti pojave proizvoda oksidacije dobija više informacija, nego samo određivanjem neutralizacionog broja, jer se na infracrvenom spektru identifikuju osim kiselina i drugi proizvodi oksidaciji kao što su alkoholi, aldehidi, estri, ketoni.

Na slici 3 prikazan je grupni sastav aromatičnih ugljovodonika mono–, di– i tricikličnih metodom tečne hromatografije (HPLC).

Tabela 5. Rezultati regeneracije uzorka 2
Table 5. Sample 2 regeneration results

Karakteristike	Pre regeneracije	Nakon regeneracije	Nakon regeneracije + 0,3% DBPC	Nakon regeneracije + 0,3% DBPC + 29 mg/kg pasivizatora metala
Proba (mesto uzorkovanja)	donja			
Temperatura ulja, ^oC	35			
Diel. čvrstoća, KV/cm	266,8	288		
Inhibitor (DBPC), %m/m	0	0		
Talog u n–heptanu kval / %m/m	nema	nema		
Neutralizacioni broj, mgKOH/g				
1999.	0,08			
2003.	0,1			
2006.	0,18	0,03 0,01*		
Boja	3	L 1		
Tačka paljenja, ^oC	148	154		
Međupovršinski napon, mN/m	18,6	43,1		
tg $\delta \times 10^3$	27,2	1,0		
Grupni sastav $C_A/C_P/C_N$, %	16,4/48,4/35,2	16,3/49,3/34,4		
Ektinkcija na 1714cm^{-1} (Infracrvena spektroskopija)	0,29	0,1 < 0,005*		
Oksidaciona stabilnost				
Vreme oksidacije		164 h	500 h	500 h
Ukupna Kiselost mg KOH/g		0,80*	1,51	0,66
Isparljiva		0,16*	0,16	0,04
Rastvorljiva		0,64*	1,35	0,62
Talog %		0,37*	0,78	0,18
PCA, % m/m	2,5	2,5		
Aromati, % m/m (mono/di/tricikličnі)	8,9/1,3/1,2	9,1/1,4/1,1		
Čestice, ISO 4406/99	20/18,15			
H_2, ppm	6			
CH_4, ppm	18			
C_2H_2, ppm	11			
C_2H_4, ppm	50			
C_2H_6, ppm	14			
CO, ppm	107			
CO_2, ppm	1188			

* Regeneracija sa 22% adsorbensa

Rezultati analize aromatičnih ugljovodonika tečnom hromatografijom (HPLC), slika 3 pokazuje nepromenjenu aromatičnu strukturu (razlike kod mono– di– i tricikličnih aromata su u granici greške metode).

PRIMERI IZ PRAKSE

Revitalizacija uljno–papirne izolacije na mestu eksploatacije

Postupci revitalizacie uljno–papirne izolacije izvršeni su priključivanjem uređaja sa adsorbensom na transformator i višestrukim propuštanjem TU kroz uređaj i ponovnim vraćanjem u transformator.

Slučaj 1:

Transformator: T–6

Snaga: 20 MVA

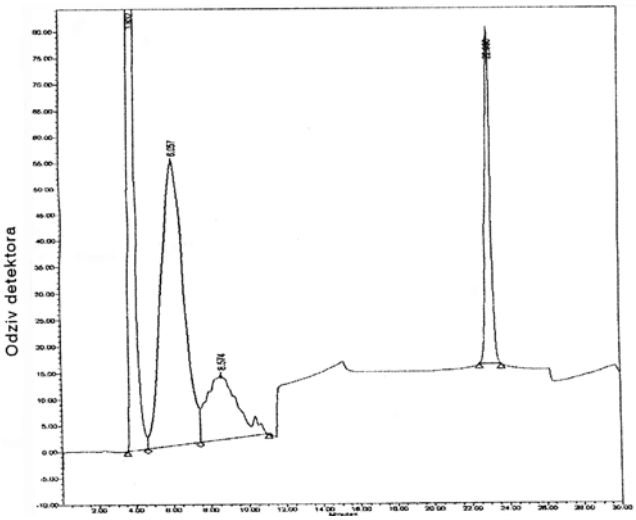
Napon: 110/35 kV

Količina ulja: 15 t

God proizvodnje: 1960.

U tabeli 6 prikazani su rezultati revitalizacije uljno–papirne izolacije

U tabeli 7 prikazani su rezultati za revitalizacije izolacije za slučajeve 2, 3 i 4.



Slika 3. Grupni sastav aromatičnih ugljovodonika (HPLC spektar) uzorka 2 pre regeneracije
Figure 3. Sample 1 group composition aromatic hydrocarbons(HPLC) prior to regeneration

Podaci sa terena, prikazani u tabelama 6 i 7, potvrđuju laboratorijska ispitivanja, što je naročito vidljivo u Slučaju 1. gde je osim osnovnih karakteristika ispitana i oksidaciona stabilnost ulja nakon regeneracije koja predstavlja jednu od najvažnijih karakteristika ulja za dugotrajnu upotrebu i veliku zaštitu za papirnu izolaciju, jer se smatra da je vek papira i vek samog transformatora.

ZAKLJUČCI

Osnovni faktor koji uslovljava mogućnost višekratne regeneracije ulja je stepen starosti izolacije. Ulaganje u monitoring i pravovremene tretmane mogu da stvore uslove za teorijski neograničen broj regeneracija ulja sa "nula otpada".

U slučaju transformatorskih ulja ciljevi vezani za zaštitu životne sredine i ekonomski se poklapaju što nije uvek slučaj. Češće se očuvanje životne sredine povezuje sa dodatnim troškovima.

Preporuke za dve faze životnog ciklusa: *Proaktivno održavanje i praćenje transformatorskih ulja u to-*

Tabela 6. Rezultati revitalizacije izolacije transformatora (Slučaj 1)
Table 6. Transformer insulation revitalization results (Case 1)

	Karakteristike ulja	Pre tretmana	Posle tretmana
1	Dielektrična čvrstoća, kV/cm	300	290
2	Međupovršinski napon, mN/m	27	47
3	Neutralizacioni broj, mgKOH/g	0,04	0,003
4	tg δ x 10^3	345	16
5	Čestice, ISO 4406	18/16/14	14/13/10
6	Oksidaciona stabilnost		
	Vreme oksidacije	164 h	164 h
	Kiselost, mg KOH/g		
	Isparljiva	0,38	0,063
	Rastvorljiva	0,66	0,049
	Ukupna	1,04	0,112
	Talog, %	0,124	0,004
7	Grupni sastav, Ca/Cp/Cn, %	6,0/47,5/46,5	5,0/46,8/48,2
8	E na 1725 cm^{-1} (inracrvena spekt.)	0,025	0,006

Tabela 7. Rezultati revitalizacije izolacije transformatora (slučajevi 2,3 i 4) [12]
Table 7. Transformer insulation revitalization results (Case 2,3 and 4) [12]

Karakteristike ulja	Slučaj 2		Slučaj 3		Slučaj 4	
	TE Kolubara, 10 MVA, 1960		TE Morava, 15 MVA		ED Čačak, 20 MVA	
	Pre	posle	pre	posle	pre	posle
Sadržaj vode, ppm	10	6	–	–	–	–
Dielektrična čvrstoća, kV/cm	248	287	291	290	280	291
Međupovršinski napon, mN/m	17	47	25	39	18	36
Neutralizacioni broj, mgKOH/g	0,09	0,01	0,06	0,01	0,08	0,01
tg δ x 10^3	400	33	95	16,7	101	17
Čestice, ISO 4406	23/19	17/13	–	–	–	–

ku upotrebe i *regeneraciju transformatorskih ulja u cilju produženja upotrebe i revitalizaciju papirne izolacije prečišćavanjem ulja* su sledeće:

– Povećanje broja analiza ulja – usavršavanjem instrumentacije i metoda ispitivanja dobijaju se podaci relevantni za procenu stanja ulja, a posredno pravilnosti rada transformatora i stanja čvrste izolacije

– Uvođenje infracrvene spektroskopije kao redovne analize za utvrđivanje sadržaja inhibitora, brzine starenja (oksidacije) i stepena oksidisanosti ulja (interval od 1800 do 1670 cm^{-1}), se preporučuje. Primenom savremenih spektrofotometara sa Furijeovim transformacijama, brzo se može doći do korisnih informacija, naročito ako se upotrebljavaju prenosni uređaji na mestu eksploatacije. Infracrvenom spektroskopijom detektuju se osim kiselina i ostali polarni proizvodi koji nastaju pri oksidaciji ulja, koji se uobičajenim metodama ispitivanja TU u eksploatacije ne detektuju.

– Multidisciplinaran rad na dijagnostici:

- uspostavljanje odnosa između karakteristika ulja i gasne analize,

- povezivanje podataka iz gasne analize sa fenomenima u transformatoru,

- uspostavljanje odnosa između karakteristika ulja i podataka o radu transformatora i eventualnih kvarova,

- učestalost i vrstu analiza transformatorskog ulja određivati prema prethodnim analizama, radnoj istoriji i prethodnim eventualnim kvarovima.

– Praćenje trenda kako fizičko–hemijskih analiza transformatorskog ulja tako i DGA, kao osnove za odlučivanje.

– On–line određivanje vlage i DGA (po mogućstvu za jedinice od posebnog značaja).

– Održavanje minimalne koncentracije vode u cilju sprečavanja degradacije izolacije i rezultujućih kvarova.

– Preispitivanje graničnih vrednosti fizičko–hemijskih karakteristika ulja pri pristupanju regeneraciji/revitalizaciji u cilju povećanja pouzdanosti, sprečavanja kvarova i uštede.

– Blagovremena revitalizacija uljno–papirne izolacije.

– Pri izboru adsorbensa za regeneraciju/revitalizaciju uljno–papirne izolacije obratiti pažnju na mogućnost regeneracije adsorbensa u cilju sprečavanja nastajanja otpadnog zauljenog adsorbensa koji predstavlja opasan otpad.

– Pri inhibiranju ulja nakon regeneraciji ispitati mogućnost dodavanja pasivizatora metala u cilju sprečavanja negativnog dejstva korozivnog sumpora.

LITERATURA

[1] G. Daemisch, Geriatrics of transformers, www.transformer–consulting.com

[2] P.C. McShane, Seed Oil–Based Dielectric Coolant Serves as a Solution for Aging Transformers, Electric energy on line, 2006.

[3] S. Fields, Building a better biolubricant, Environmental Health Perspectives, **111** (12) September 2003.

[4] C.P. McShane, J. Luksich, K.J. Rapp, Experience in retrofilling older transformers with natural ester based dielectric coolant, International Conference of Doble Clients, April 7–12, 2002.

[5] C.P. McShane, J.Corkran, K. Rapp, J. Luksich, Natural Ester Dielectric Fluid Development; IEE PES T&D Conference, May 2006.

[6] Enhanced Transformer Insulation Life, www.cooperpower.com

[7] V. Sokolov,A. Bassetto,T.V. Oommen,T. Haupert, D. Hanson, Transformer fluid: a powerful tool for the life management of an ageing transformer population, Proceedings of the TechCon 2003 Asia–Pacific.2003.

[8] V. Pejović, Hemija u elektroenergetici – Transformatorska ulja, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Ražnatović, Beograd, 2005, ISBN 86–83349–05–5

[9] Z. Wang, Artificial intelligence applications in the diagnosis of power transformer incipient faults, Dissertation, Faculty of the Virginia polytechnic institute and state university, 2000.

[10] L. Lewand, Techniques for Interpretation of Data for DGA From Transformers, IEEE conference, 2006.

[11] Transformer Oil Handbook, ISBN no. 91–631 4982–6 Nynas Naphthenic AB Sweden, 1st ed., 2004.

[12] D. Pantić, V. Pantić, K. Đurđević, Starenje, usporavanje starenja i revitalizacija uljno–papirne izolacije energetskih transformatora, Elektrane 2006.

[13] S. Kovačević, N. Dominelli, B. Ward, Extending transformer life through continuous on–line conditioning, Electricity Today, Iss– 8, 2003.

[14] K. Sundkvist, A.Kalantar, New method for regenerating transformer oil, Naphtenic magazine 4, 2006.

[15] D. Pantić, R. Radosavljević, K. Đurđević, Revitalizacija uljno–papirne izolacije energetskih transformatora na terenu. JUKO CIGRE 27. Savetovanje, 29 maj–03. jun 2005.

[16] Cost of reclamation, Electrical Oil Services Ltd (EOS), www.eosl.co.uk

[17] K. Đurđević, M. Vojinović–Miloradov, S. Sokolović, Đ. Bašić, Upravljanje otpadom – poslednja faza životnog ciklusa mineralnih ulja, Međunarodna konferencija Otpadne vode, komunalni čvrsti otpad i opasan otpad, Subotica, 10–13. april 2006.

[18] K. Đurđević, M. Vojinović–Miloradov, S. Sokolović, Đ. Bašić, J. Vukadinović–Lazić, Opasne materije – dokumentacija i regulativa, Prvi međunarodni stručni skup Opasne materija u životnoj sredini i radnoj okolini, Igalo 2006.

[19] V. A. Pantić, D.V. Pantić., B. Mirosavljević, Extension of the lifetime and increase od the transformer operation safety on the grid, 39th CIGRE Session, August 2002.

SUMMARY

LIFE CYCLE OF TRANSFORMER OIL

(Professional paper)

Ksenija R. Đurđević[1], Mirjana Vojinović–Miloradov[1], Slobodan M. Sokolović[2]
[1]Petroleum Industry of Serbia, Novi Sad Refinery, Novi Sad
[2]Technical Faculty, Department of Environmental Protection, Novi Sad

The consumption of electric power is constantly increasing due to industrialization and population growth. This results in much more severe operating conditions of transformers, the most important electrical devices that make integral parts of power transmission and distribution systems. The designed operating life of the majority of worldwide transformers has already expired, which puts the increase of transformer reliability and operating life extension in the spotlight. Transformer oil plays a very important role in transformer operation, since it provides insulation and cooling, helps extinguishing sparks and dissolves gases formed during oil degradation. In addition to this, it also dissolves moisture and gases from cellulose insulation and atmosphere it is exposed to. Further and by no means less important functions of transformer are of diagnostic purpose. It has been determined that examination and inspection of insulation oil provide 70% of information on transformer condition, which can be divided in three main groups: dielectric condition, aged transformer condition and oil degradation condition. By inspecting and examining the application oil it is possible to determine the condition of insulation, oil and solid insulation (paper), as well as irregularities in transformer operation.

All of the above–mentioned reasons and facts create ground for the subject of this research covering two stages of transformer oil life cycle:

(1) proactive maintenance and monitoring of transformer oils in the course of utilization with reference to influence of transformer oil condition on paper insulation condition, as well as the condition of the transformer itself;

(2) regeneration of transformer oils for the purpose of extension of utilization period and paper insulation revitalization potential by means of oil purification.

The study highlights advantages of oil–paper insulation revitalization over oil replacement. Besides economic, there are advantages concerning environmental protection, starting from unrecoverable resources (petroleum) saving through power and energy saving to waste reduction. Adequate management of transformer oil life cycle, meaning timely and technologically updated regeneration process, prevents waste production. Regeneration by means of synthetic adsorbents in laboratory conditions as well as on site has ensured and provided satisfactory results with reference to oil quality improvement. It has also confirmed and substantiated the necessity of regeneration implementation before the paper insulation is damaged.

Key words: Life cycle • Transformer oil • Regeneration •

Ključne reči: Životni ciklus • Transformatorsko ulje • Regeneracija •