

Univerzitet u Beogradu
Elektrotehnički fakultet



SAFAA ISMAEL AL-MUSAWI

**EVALUACIJA PREOSTALOG RADNOG VEKA
ENERGETSKOG TRANSFORMATORA VISOKOG NAPONA
U RADNIM USLOVIMA**

Doktorska disertacija

Beograd, jul 2018. godine

University of Belgrade
School of Electrical Engineering



SAFAA ISMAEL AL-MUSAWI

**THE OIL-PAPER INSULATION RELIABILITY ESTIMATION
OF 420 kV TRANSFORMER CONCERNING THERMAL
STRESSES DURING EXPLOITATION CONDITIONS**

Doctoral dissertation

Belgrade, July 2018.

Mentori:

Dr Zoran Lazarević, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Dr Zoran Radaković, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu - Elektrotehnički fakultet

Član komisije:

Dr Đorđe Janačković, redovni profesor

Univerzitet u Beogradu - Tehnološko-metalurški fakultet

Datum odbrane: _____

Naslov disertacije: Evaluacija preostalog radnog veka energetskog transformatora visokog napona u radnim uslovima

REZIME

U radu se razmatra problem procene preostalog radnog veka transformatora. Rad se bazira na eksperimentalnim podacima na transformatoru sa nazivnim karakteristikama 380 MVA, 2×15,75 kV/420 kV, d5/d5/YN, OFWF (tip hlađenja). Fokus u radu je na analizi podataka dobijenim hemijskim analizama ulja, kao i papirne izolacije skidane sa namotaja, koje je jedino moguće ako se transformator stavi van pogona i otvori.

Dakle, vršena su merenja stepena polimerizacije na papirnim uzorcima, koji su uzeti neposredno sa namotaja nižeg napona (krajeva namotaja) i veza na sabirnice transformatora koji se ispituje,. Opisuje se ceo postupak za određivanje mesta uzoraka papira i njihovo uzimanje, kao i način na koji ovo treba da se uradi, određen posebnim uslovima za transformator koji se ispituje.

Dalje, određivanje granične viskoznosti i upotreba funkcije korelacije se objašnjavaju zajedno sa stepenom polimerizacije. Pravi se poređenje sa tečnom hromatografijom ulja. Prikazuju se rezultati analize vrste i veličine čestica.

Procena gubitka životnog veka na osnovu istorijata opterećenja je jedna od mogućih metoda, i algoritam za njegovu realizaciju je dat u IEC standardima. U vezi sa tim, u radu se analizira termički aspekt – odnos najviše temperature u namotaju, koja se koristi u algoritmu iz standarda i temperature na mestu mogućeg uzorkovanja papira na vezama namotaja i na sabirnicama.

Konačno, prikazuje se procena preostalog životnog veka transformatora, koja je od najvećeg značaja kada se određuju koraci koji treba da se načine, ili u procesu revitalizacije ili u planiranju zamene transformatora.

Ključne reči — generatorski (blok) transformator - čvrsta izolacija - starenje – procena životnog veka - indeks polimerizacije.

Naučna oblast: Energetika

Uža naučna oblast: Energetski pretvarači i pogoni

UDK broj: 621.3

Dissertation title: The oil-paper insulation reliability estimation of 420 kV transformer concerning thermal stresses during exploitation conditions

SUMMARY

The calculating of reached ageing based on the history of loading according of International Electrotechnical Commission standard algorithm is the first task. In order to verify the obtained results, measurements of polymerization index were made on 28 paper samples taken directly from low voltage terminals (winding ends) and bus connections of the transformer under test rated 380 MVA, 2×15,7kV/420 kV. The complete procedure of paper sample locations and taking off is described, thereby providing a manner of how this should be done, determined by specific conditions of the transformer under test. Furthermore, the determination of limit viscosity and using its relationship function with polymerization index are explained together. Comparison is made with those of liquid chromatography of oil. The results of particle sort and size analysis are shown. Finally, an estimation of the transformer life remainder is made, which is of paramount importance when defining the steps that have to be made either in revitalization process or in transformer replacement planning.

Key words: generator, transformer, thermal stress, solid insulation, ageing, life estimation, polymerization index

Research area: Power engineering

Research sub-area: Power converters and drives

UDC number: 621.3

SADRŽAJ

1. UVOD	8
2. PROIZVODNJA I HEMIJSKI SASTAV TRANSFORMATORSKIH ULJA	10
2.1 Proizvodnja transformatorskih ulja	10
2.2 Hemijski sastav transformatorskih ulja	12
3. KARAKTERISTIKE TRANSFORMATORSKIH ULJA	16
3.1 Fizičke karakteristike ulja.....	16
3.2 Hemijske karakteristike ulja	24
3.3 Električne karakteristike ulja	30
4. SINTETIČKA TRANSFORMATORSKA ULJA	33
4.1 Polihlorovani bifenili (PCB) kao izolacione tečnosti	33
4.2 Silikonska ulja.....	35
5. STANDARDIZACIJA IZ OBLASTI TRANSFORMATORSKIH ULJA.....	37
6. NOVA TRANSFORMATORSKA ULJA.....	42
6.1 Izbor novog transformatorskog ulja	42
6.2 Rukovanje uljima i uzimanje uzoraka ulja.....	43
6.3 Obrada ulja sušenjem i filtriranjem	44
6.4 Rezultati ispitivanja.....	44
IEC1125C.....	46
7. TRANSFORMATORSKA ULJA IZ POGONA	49
7.1 Stanje ulja transformatora iz pogona.....	49
7.2 Rezultati ispitivanja ulja iz pogona.....	50
7.3 Obrada transformatorskih ulja iz pogona.....	53
8. MIJEŠANJE TRANSFORMATORSKIH ULJA	59
9. TERMIČKI PRORAČUN	61
9.1 Opšta jednačina za proračun zagrijavanja provodnih dijelova pri jednodimenzionalnom fluksu	62
9.2 Ustaljeno zagrijavanje provodnih sistema kada postoji linearni toplotni fluks. 65	
9.3 Proračun ustaljenog zagrijavanja provodnika presjeka koji se stepenasto mijenja po dužini.....	68

10. REZULTATI EKSPERIMENTA	74
10.1 Uzimanje uzoraka sa GT papirne izolacije	75
10.2 Metod merenja i rezultati merenja	78
10.3 Analiza izmerenih rezultata	81
10.4 Procena preostalog radnog veka generatorskog (blok) transformatora zasnovano na njegovom stvarnom stanju	82
10.5 Određivanje sadržaja furana i čestica u ulju za GT	84
ZAKLJUČAK.....	87
LITERATURA	90
Прилог 1.....	93
Прилог 2.....	94
Прилог 3.	95

1. UVOD

Od izolacionih tečnosti koja se koriste u visokonaponskoj opremi, na prvom mjestu izdvajamo transformatorska ulja mineralnog porijekla koja u transformatorima izoluju dijelove pod naponom i odvođe toplotu, a u električnim prekidačima i sklopkama imaju ulogu i da gase električni luk. Iako se mineralno ulje proizvedeno iz sirove nafte u svijetu koristi preko 100 godina u transformatorima, ono i danas nudi, u odnosu na druge izolacione tečnosti, najbolji kompromis cijena/performance. Druge mnogo skuplje izolacione tečnosti kao što su silikonska ulja, neke vrste organskih estara i sl. danas se koriste samo u slučajevima kada njihove specifične karakteristike mogu opravdati visoku nabavnu cijenu. Poseban slučaj su sintetičke tečnosti polihlorovani bifenili (PCB), poznate kao "askarele" koje se ne proizvode već duže vrijeme jer su kancerogene, ali se još uvijek mogu naći u eksploataciji u transformatorima i kondenzatorima.

Treba razlikovati ispitivanje uzoraka novih transformatorskih ulja i uzoraka ulja transformatora iz eksploatacije u cilju utvrđivanja stanja i kvaliteta samog ulja od ispitivanja uzoraka ulja čiji rezultati ukazuju na stanje i ispravnost izolacionog sistema transformatora i samog transformatora kao cjeline.

Ispitivanje stanja i kvaliteta novog ulja koje se koristi za nalivanje novih transformatora ili za dolivanje ulja transformatora iz pogona je veoma važno. Transformatorsko ulje treba da traje u transformatoru koliko i sam transformator, preko 40 godina neprekidnog pogona, a to je moguće samo ako je za prvo punjenje transformatora upotrebjeno ulje dobrog kvaliteta. Troškovi koji nastaju zbog kraćeg vijeka transformatora ili transformatorskog ulja i njegovog isključenja iz pogona radi odgovarajućih intervencija kao što je zamijena ostarjelog ulja novim, obrada ulja fizičkim ili hemijskim metodama, daleko prevazilaze troškove upotrebe novog, skupljeg ali kvalitetnijeg ulja. Poznato je takođe da životni vijek papirne izolacije veoma zavisi od stanja i kvaliteta transformatorskog ulja, jer degradacioni produkti ulja ubrzavaju degradaciju celuloznih vlakana papirne izolacije, a samim tim nepovratno smanjuju radni vijek transformatora.

U toku dugogodišnje eksploatacije transformatora pod pogonskim uslovima, izolacioni sistem i samo ulje stari, mijenja neke od svojih bitnih karakteristika. Brzina starenja ulja zavisi od njegovog početnog kvaliteta i pogonskih uslova kao što su opterećenje transformatora, odnosno radna temperatura ulja, količina rastvorenog kiseonika iz vazduha u ulju, vlažnost ulja i celuloze, katalitičkog dejstva metalnih konstrukcionih dijelova i dr. Povremenim uzimanjem i ispitivanjem uzoraka ulja transformatora u radu na vrijeme se interveniše prije nego se ovlaži celulozna izolacija ili izdvoje produkti starenja ulja kao mulj ili talog na vitalnim dijelovima transformatora.

Osim svoje osnovne funkcije ulje transformatora daje važne informacije o ispravnosti samog transformatora u radu. Mjerenjem gasovitih produkata razaranja izolacije transformatora rastvorenih u ulju gasnohromatografskom analizom uzoraka ulja eng = Dissolved Gas Analysis (DGA), moguće je utvrditi prisustvo ili odsustvo kvara u transformatoru još dok je u radu, pod naponom. Tako na primjer, analizom ulja transformatora u radu može se na vrijeme dati upozorenje o pojačanoj degradaciji papirne izolacije, o prisustvu toplih tačaka u izolaciji, električnim pražnjenjima, kao i o problemima vezanim za uljne pumpe i dr. U zavisnosti od vrste gasova i njihove koncentracije, odnosno porasta u odnosu na prethodno mjerene vrijednosti, moguće je utvrditi da li je degradacija izolacije termičke ili električne prirode, te intenzitet razaranja. Da bi sve ove metode ispitivanja ulja imale što više koristi u praksi, neophodne su redovne, preventivne kontrole transformatora iz pogona uzimanjem uzoraka ulja u određenim isplaniranim vremenskim periodima.

U radu se razmatra problem procene preostalog radnog veka transformatora. Rad se bazira na eksperimentalnim podacima na transformatoru sa nazivnim karakteristikama 380 MVA, 2×15,75 kV/420 kV, d5/d5/YN, OFWF (tip hlađenja). Fokus u radu je na analizi podataka dobijenim hemijskim analizama ulja, kao i papirne izolacije skidane sa namotaja, koje je jedino moguće ako se transformator stavi van pogona i otvori.

Dakle, vršena su merenja stepena polimerizacije na papirnim uzorcima, koji su uzeti neposredno sa namotaja nižeg napona (krajeva namotaja) i veza na sabirnice transformatora koji se ispituje,. Opisuje se ceo postupak za određivanje mesta uzoraka papira i njihovo uzimanje, kao i način na koji ovo treba da se uradi, određen posebnim uslovima za transformator koji se ispituje.

Dalje, određivanje granične viskoznosti i upotreba funkcije korelacije se objašnjavaju zajedno sa stepenom polimerizacije. Pravi se poređenje sa tečnom hromatografijom ulja. Prikazuju se rezultati analize vrste i veličine čestica.

Procena gubitka životnog veka na osnovu istorijata opterećenja je jedna od mogućih metoda, i algoritam za njegovu realizaciju je dat u IEC standardima. U vezi sa tim, u radu se analizira termički aspekt – odnos najviše temperature u namotaju, koja se koristi u algoritmu iz standarda i temperature na mestu mogućeg uzorkovanja papira na vezama namotaja i na sabirnicama.

2. PROIZVODNJA I HEMIJSKI SASTAV TRANSFORMATORSKIH ULJA

U ovom poglavlju govorit ćemo isključivo o mineralnim izolacionim uljima koji su prirodni proizvod iz nafte. U eksploataciji se u znatno manjim količinama nalaze i transformatori punjeni sintetičkim uljima, koja će biti pomenuta u jednom od narednih poglavlja.

2.1 Proizvodnja transformatorskih ulja

Mineralna transformatorska ulja se proizvode iz sirove nafte, prirodne sirovine, koja se može podijeliti na laku i tešku ali i na parafinsku i naftensku. Naftenske nafte su obično bogate bitumenima i teškim destilatima pa se svrstavaju u kategoriju teških nafti. Parafinske nafte su bogate gasovima, benzinom što ih svrstava u kategoriju lakih nafti. Izbor nafte zavisi od rafinerije, odnosno za koju vrstu proizvodnje je specijalizovana. Za većinu rafinerija proizvodnja procesnih i baznih ulja iz kojih se proizvode motorna i transformatorska ulja čini samo 1% ukupne proizvodnje, 96% je gorivo a ostatak od 3% je bitumen.

Proizvodnja transformatorskih ulja može se podijeliti u nekoliko osnovnih faza, koje su šematski prikazane na slici 2.1

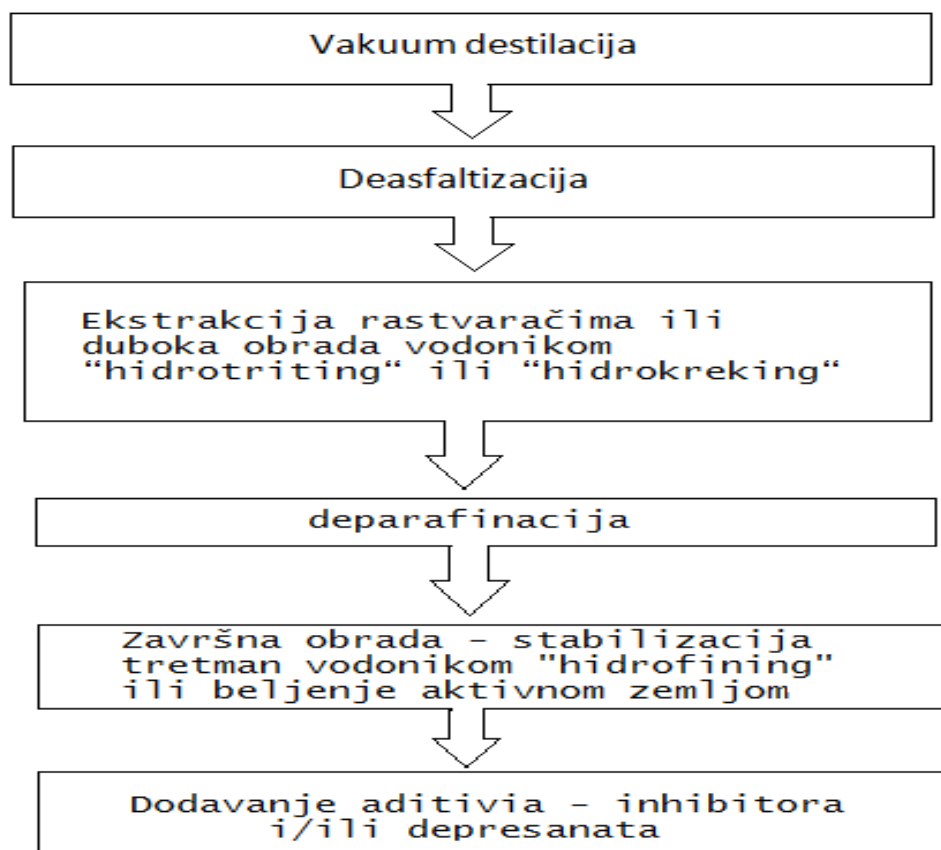
Primjenom vakuuma snižava se tačka ključanja ugljovodonika i postiže odvajanje težih metala. Procesom vakum destilacije izdvajaju se destilati-produkti u različitim opsezima ključanja. Iznad maksimalne temperature odvajanja počinje termička dekompozicija (krekovanje) ulja, a kao ostatak ovog procesa dobija se bitumen. Za dalju proizvodnju transformatorskog ulja izdvaja se destilat odgovarajuće viskoznosti i naziva se trafo baza.

Deasfaltizacijom se iz ostatka atmosferske destilacije pomoću rastvarača, najčešće propana, uklanjaju iz uljne frakcije asfalteni i smole.

Rafinacijom uljnih frakcija rastvaračima tzv. solventna ekstrakcija, uklanjaju se nepoželjna aromatska jedinjenja, uglavnom policiklični aromati, PCA, za što postoji više tehnologija. Najstarija metoda tretiranja sumpornom kiselinom i kasnije krečom je zbog štetnosti nus proizvoda prevaziđena.

Deparafinacija je izdvajanje čvrstih voskova iz ulja što opet zavisi od tipa nafte iz koje je proizvedena trafo baza. Naftenska nafta skoro uopšte ne sadrži n-parafine i ne zahteva njihovo uklanjanje, što je neophodno uraditi kod parafinskih nafti da bi se postigle odgovarajuće niskotemperaturne karakteristike. Neke rafinerije koriste molekulska sita, dok druge ulje rastvaraju u odgovarajućim rastvaračima, a zatim ga

hlade. Ovom metodom se izdvajaju kristali parafina i odvajaju filtriranjem, a rastvarač se odvajaju destilacijom.



Slika 2.1 Šematski prikaz proizvodnje transformatorskih ulja

U savremenim rafinerijama specijalizovanim za proizvodnju specijalnih ulja, u koje spadaju i transformatorska ulja, uglavnom se koristi metoda hidrogenizacije, tzv. „hidrotreating“ ili duboka rafinacija, tzv. hidrokreking zavisno od uslova temperature i pritiska. Dok su gore dvije pomenute metode fizičke, metoda hidrogenizacije se zasniva na hemijskoj konverziji ovih molekula u poželjne molekule. To se postiže pomoću odgovarajućih katalizatora, vodonika i visokog pritiska i temperature. Pri odgovarajućim uslovima pritiska i temperature uklanjaju se sumpor, azot i kiseonik kao jedinjenja H_2S sumporvodonič, NH_3 amonijak, H_2O voda. Zatim se reakcijama hidrogenovanja otvaraju nezasićeni aromatski prstenovi, a hidrokrekovanjem cijepaju dugočlani ugljovodonici u jedinjenja manje molekulske mase. Na ovaj način se smanjuje količina policikličnih aromata, u ulju zadržavaju molekuli monoaromata a takodje i uklanjaju nepoželjna parafinska jedinjenja i poboljšavaju niskotemperaturne osobine ulja. Ovako dobijeni rafinatti su visokog kvaliteta, imaju visoku oksidacionu stabilnosti i nizak sadržaj policikličnih aromata.

Završna faza obrade ulja je bijeljenje aktivnom zemljom i dodavanje aditiva (obično inhibitora oksidacije i/ili depresanti za poboljšanje niskotemperaturnih karakteristika ulja).

U tabeli 2.1 date su koncentracije glavnih komponenti ulja prije i poslije rafinacije sirovog ulja, a opseg zavisi od tipa sirovog ulja. Usvojena je podijela da se naftenskim uljima smatraju ulja koja imaju 42-45% parafinskih ugljovodonika C_P , a parafinskim uljima se smatraju ulja koja sadrže 56-65% parafinskih ugljovodonika, (C_N i C_A su naftenski i aromatski ugljovodonici). Varijacije ostalih komponenti ulja zavise od početne sirovine, postupka rafinacije tj. od rafinerijske tehnologije, kao i od toga koji kvalitet ulja se želi dobiti.

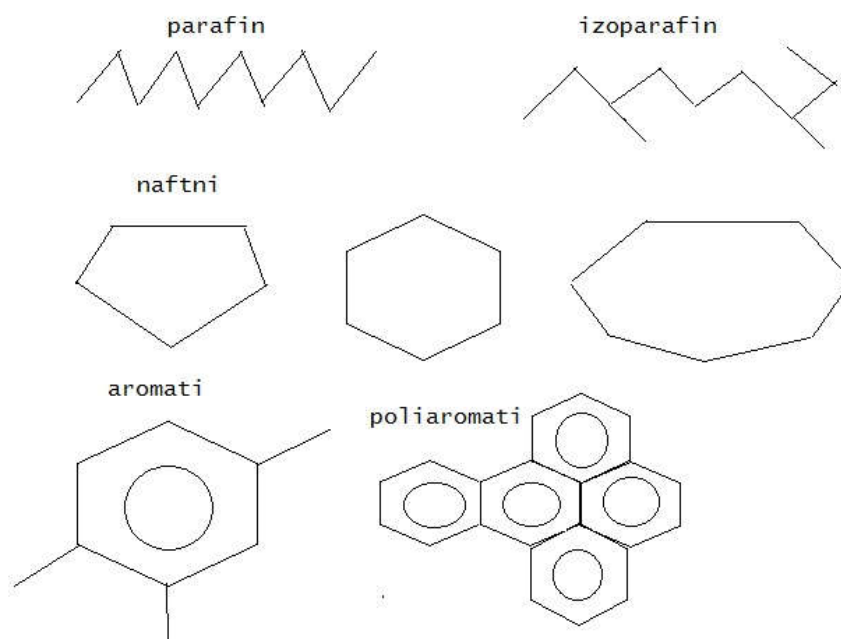
Tabela 2.1 Oblast koncentracija komponenti ulja prije i poslije rafinacije sirovog ulja

Vrsta	Količina prije Rafinacije	Količina poslije rafinacije
N – alkalni % mas.	0.05 – 15	0.1 – 10
C_p - % IR metodom	42 – 65	42 - 70
C_n - % IR metodom	razlika do 100%	razlika do 100%
C_a - % IR metodom	14 – 25	2 – 18
PCA % mas.	≥ 2	0.02 - 2.5
Sumpor % mas.	1.0 - 2.0	0.01 - 1.0
Azot , ppm	70 – 600	1 – 300
Sadržaj kiselina	0.05 – 2.0	0.01 – 0.03

2.2 Hemijski sastav transformatorskih ulja

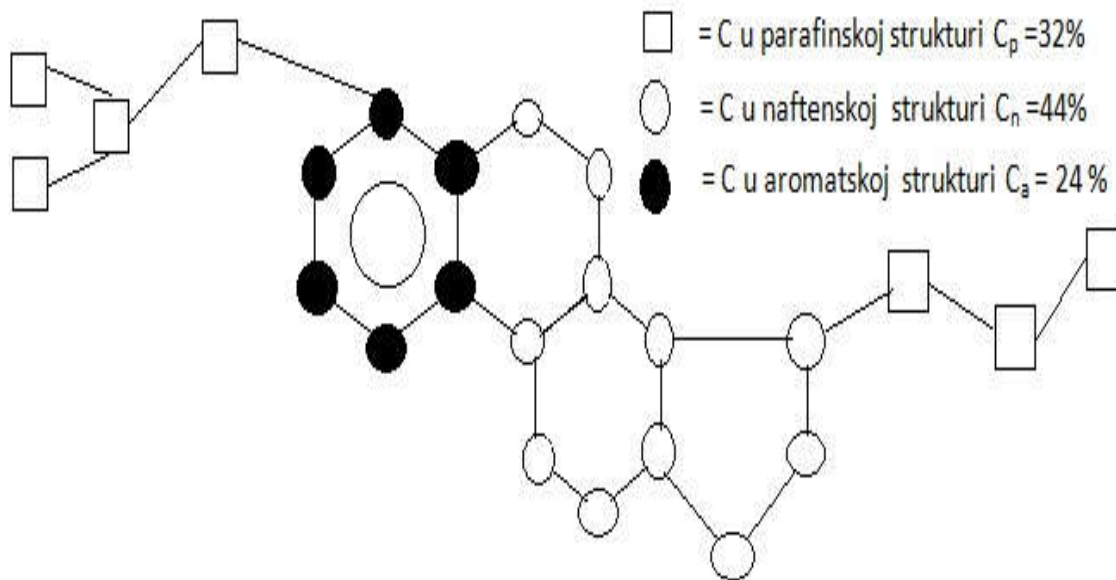
Mineralna transformatorska ulja se proizvode iz nafte i predstavljaju rafinisane vakum destilate , a po svom hemijskom sastavu predstavljaju smjesu naftenskih C_N , parafinskih C_P , i aromatskih C_A ugljovodonika. Sadržaj prva dvije grupe ugljovodonika u ulju zavisi od toga da li se ulje dobija iz naftenske ili parafinske nafte, dok je sadržaj aromatskih komponenti sličan kod oba tipa ulja i kreće se od 4-18 % i on je najvažniji za kvalitet ulja. Naftenska nafta je u ranijim godinama, kao pogodnija, najčešće korištena za proizvodnju ulja, dok u zadnje vrijeme, razvojem novih tehnologija i zbog nestašice naftenske, primat uzima parafinska nafta.

Osnovna ugljovodonična struktura mineralnih ulja prikazana je na sl. 2.2. Parafinski ugljovodonici mogu biti linearni (normalni ili n-parafini ili n-alkalni) i račvasti izo-parafini. Ulja koja sadrže nedozvoljeno velike količine n-parafina ometaju cirkulaciju ulja u transformatoru u hladnim uslovima zbog izdvajanja voskova u sebi. Ovi molekuli se odlikuju malom rastvorljivosti u vodi i u proizvodima oksidacije ulja i niskom termičkom stabilnošću. Naftenski ugljovodonici u obliku su prstena od 5, 6, ili 7 ugljenikovih atoma, još se nazivaju i cikloalkalni i posjeduju odlične niskotemperaturne karakteristike.



Slika 2.2 Osnovna ugljovodonična struktura u mineralnim uljima

Aromatski ugljovodonici javljaju se kao monoaromati (sastoje se od 6 atoma ugljenika sa jednostrukim ili dvostrukim vezama) i policiklični aromati (sastoje se od više povezanih molekula monoaromata). Monoaromati imaju dobre električne osobine, dobro apsorbuju gasove i relativno su stabilni na oksidaciju. Aromatski ugljovodonici koji imaju više međusobno povezanih molekula, monoaromata, nazivaju se policiklični aromati (PCA). Sa porastom tačke ključanja ulja povećava se i sadržaj policikličnih aromata u ulju, pa ulje bolje apsorbuje gasove. Dejstvo im je slično kao i kod inhibiranih ulja kod kojih se fenolni inhibitor naknadno dodaje transformatorskom ulju. Molekuli u ulju su povezani u molekularne strukture različitih vrsta. Jedan tipičan molekul mineralnog ulja prikazan je na slici 2.3.



Slika 2.3 Tipičan molekul mineralnog ulja

Razvijeno je više metoda za određivanje grupnog sastava ulja, koji se izražava u procentima, a najbolja od njih je infracrvena spektrofotometrija (IR metoda), kojom se određuje procenat ugljenika povezan u aromatsku strukturu i ugljenika povezanog u parafinsku strukturu. Razlika ova dva zbira do 100% predstavlja ugljenik povezan u naftensku strukturu.

Pored osnovne strukture molekula ugljovodonika, transformatorska ulja sadrže mali procenat azota, sumpora i kiseonika prisutnih u raznim heterocikličnim jedinjenjima. Molekuli koji sadrže azot mogu biti bazni (hinolini, piridini) ili ne-bazni (karbazoli, pirol). Sadržaj azota u ulju dosta utiče na njegove karakteristike, iako je on relativno mali i mjeri se u milionitim dijelovima. Neki molekuli azota su nosioci potencijala u električnom polju, neki utiču na smanjenje oksidacione stabilnosti ulja, neki dijeluju kao inhibitori oksidacije, dok neki dijeluju kao pasivizatori bakra ili nekog drugog metala.

Molekuli u ulju koji sadrže sumpor mogu dati ulju i pozitivne i negativne karakteristike. Neki od njih mogu izazvati koroziju bakra i srebra, dok neki opet mogu reagovati kao inhibitori koji uništavaju molekule hidroperoksida u procesu oksidacije ulja. U transformatorskim uljima najčešće nalazimo tiofene, karbazole, sulfide i disulfide.

U novim transformatorskim uljima sadržaj kiseonika u obliku heterocikličnih jedinjenja je mali. U korištenim uljima je viši usljed oksidacije pri kojoj se formiraju aldehidi, kiseline, ketoni, fenoli i ostala jedinjenja koja sadrže kiseonik. Neka od ovih jedinjenja su visoko polarni i mogu izazvati gubitke u električnom polju. Voda je takođe oksidacioni proizvod i negativno djeluje na stanje papirne izolacije u

transformatoru. Hemijski vezan kiseonik u molekulima raznih jedinjenja treba razlikovati od rastvorenog gasa kiseonika u ulju koji je obično iz vazduha i koji se može ukloniti iz ulja degazacijom.

3. KARAKTERISTIKE TRANSFORMATORSKIH ULJA

Da bi se transformatorska ulja mogla koristiti u transformatorima kao izolaciono i rashladno sredstvo, moraju da imaju odgovarajuće fizičke, hemijske i električne karakteristike. U ovom odjeljku su prikazane one karakteristike novih transformatorskih ulja i ulja iz eksploatacije, koje su standardizovane kako domaćim, tako i međunarodnim JUS, IEC i ISO standardima.

3.1 Fizičke karakteristike ulja

Da bi izolaciono ulje bilo transformatorsko, mora imati odgovarajuće osnovne fizičke karakteristike postignute još prilikom frakcione destilacije nafte. U te osobine spadaju viskoznost ulja, tačka paljenja i tačka zamućenja i tečenja ili kako se ranije nazivala stinjavanja. Prema vrijednostima ovih karakteristika, po važećim JUS standardima, razlikujemo ulja klase I i II za upotrebu u transformatorima i ulja klase III za upotrebu u električnim uljnim prekidačima. Pored ovih osnovnih karakteristika, obavezno se ispituju još i izgled, boja, gustina i međupovršinski napon ulje-voda.

Izgled ulja

Novo, kvalitetno transformatorsko ulje treba da bude bistro, svijetlo i bez prisustva bilo kakvih nečistoća. Ulje iz eksploatacije takodje treba da bude bistro bez vidljivih mehničkih primjesa. Ukoliko to nije slučaj, potrebno je izvršiti dalja ispitivanja, ali prije toga je potrebno isključiti mogućnost zagađenja prilikom uzimanja uzorka ulja, što je vrlo čest slučaj u praksi.

Kod transformatorskih ulja iz pogona može se desiti da tamnija ulja imaju bolje dielektrične karakteristike od svjetlijih, a to se dešava zbog toga što starija ulja bolje rastvaraju degradacione produkte oksidacije koji utiču na pogoršanje dielektričnih karakteristika, u odnosu na nova ulja. Ispitivanje boje ulja iz pogona vrši se radi određivanja brzine promene boje ulja u odnosu na prethodnu boju, a to može biti indicacija da izolaciono ulje brže stari i da treba izvršiti dodatna ispitivanja.

Razlikujemo kolorimetrijsku metodu određivanja boje i metodu za ispitivanje broja i veličine čvrstih čestica u transformatorskom ulju, obe standardizovane JUS propisima. Kada se vrši obrada ulja transformatora iz pogona, proticanjem ulja kroz transformator i uređaj za degazaciju i filtriranje, pored čišćenja ulja čisti se i sam transformator od prašine i slobodnih čestica. Za ova ispitivanja posebna pažnja se mora posvetiti mjestu sa koga se uzima uzorak ulja za ispitivanje kao i čistoći samog postupka uzimanja uzorka.

Gustina

Gustina ulja, d , predstavlja jedinicu mase ulja po jedinici zapremine ulja na datoj temperaturi i izražava se u kg/dm^3 ili g/cm^3 . Relativna gustina ulja je masa jedinice zapremine ulja u odnosu na masu jedinice zapremine destilovane vode, obe mjerene na istoj temperaturi.

Gustina transformatorskog ulja se mjeri na 20°C i ne smije da ima veću vrijednost od propisane, obično je u rasponu od $0,800$ do $0,900 \text{ kg}/\text{dm}^3$. Sa povećanjem temperature gustina ulja opada, kao što je prikazano na slici 3.1. Izračunavanje gustine ulja vrši se po obrascu:

$$d_{20} = d_t(1 + x(t - 20)) \quad (3-1)$$

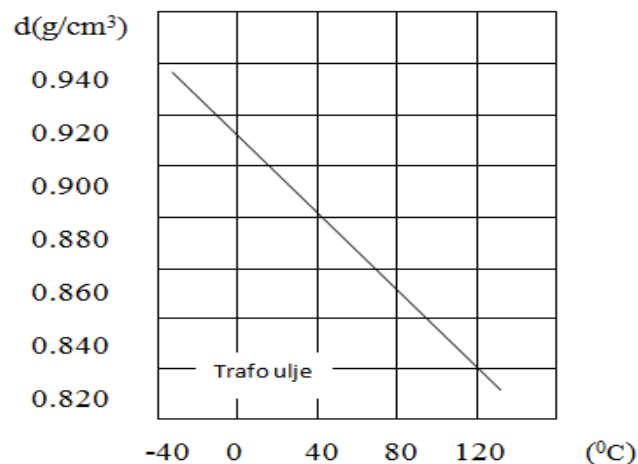
gdje je:

d_{20} - gustina na 20°C , u kg/dm^3

t - temperatura, u $^\circ\text{C}$

d_t - gustina izmjerena na temperaturi t

x - korekcionni faktor, približno $65 \times 10^{-5} \text{ g}/\text{cm}^3$



Slika 3.1. Zavisnost gustine ulja od temperature

Gustina ulja je veoma važna za ponašanje ulja na niskim temperaturama, a posebno je značajno da ulje ne bude teže od vode, da ne bi, u hladnim klimatskim uslovima pri niskim temperaturama, eventualno stvoreni led isplivao na površinu ulja i izazvao kratak spoj. Gustina sintetičkih ulja je veća od gustine vode i do 2 puta veća od gustine mineralnih ulja i o tome se mora voditi računa pri konstrukciji transformatora sa takvim uljima. Metoda za mjerenje gustine ulja areometrom je takodje standardizovana JUS standardom.

Viskoznost

Viskoznost tečnosti se može definisati kao otpor kretanja jednog sloja tečnosti prema drugom sloju što naročito dolazi do izražaja pri proticanju tečnosti kroz uske cijevi. Pri tome sloj tečnosti uz unutrašnji zid cijevi ostaje nepomičan, duž njega klizi naredni sloj i nailazi pri tome na određeni otpor. Što je sloj udaljeniji od zida to se on kreće brže, a ukoliko je unutrašnji otpor između pomenutih slojeva veći kretanje tečnosti je sporije. Sila koja pomijera sloj tečnosti određene površine i debljine određenom brzinom naziva se dinamička viskoznost. U praksi se češće koristi kinematička viskoznost koja predstavlja odnos dinamičke viskoznosti i gustine tečnosti, označava se sa ν i izražava se u mm^2/s .

Mjerenje viskoznosti kod transformatorskih ulja se vrši da bi se utvrdilo u kojoj mjeri je ulje sposobno za neometanu cirkulaciju kroz i oko namotaja transformatora. Ukoliko ulje ima veću viskoznost od propisane, može doći do smanjenja cirkulacije ulja a time i smanjenog odvođenjenja toplote sa namotaja transformatora, što dovodi do povećanja radne temperature i pregrijavanja izolacionog sistema transformatora i skraćanja njegovog radnog vijeka. Povećanje temperature može da bude i lokalnog karaktera, topla mjesta u izolaciji transformatora, što dovodi do nagomilavanja zapaljivih gasovitih produkata termičke degradacije izolacije, smanjenja temperature zapaljivosti ulja i do, u krajnjem slučaju, kvara transformatora. U hladnim uslovima eksploatacije transformatora, kada pri niskim temperaturama treba staviti transformator pod napon, veoma je važno da ulje bude dovoljno pokretljivo, odnosno da ima odgovarajuću viskoznost. To je posebno značajno za električne uljne prekidače namijenjene za spoljnu montažu pa su za njihova ulja posebni zahtjevi za viskoznost.

Prema važećim standardima viskoznost se mjeri na $+40$, $+20$, -15 , i -30° C. Na višim temperaturama viskoznost je manja, a pošto su radne temperature transformatorskog ulja obično od 40 do 70° C, dovoljno je ispitati viskoznost na nižim temperaturama, automatski će biti zadovoljavajuća i na višim temperaturama. Male promjene viskoznosti sa temperaturom označavaju visok indeks viskoznosti ν , dok velike promijene označavaju nizak indeks. Prema važećim propisima viskoznost transformatorskih ulja se mjeri kod novih ulja, dok se u toku eksploatacije viskoznost uglavnom ne mijenja, pa nije propisano mjerenje kod ulja iz pogona.

Kannon-Fenske viskozometrom standardizovana je JUS standardom u skladu sa ISO propisima. U novije vrijeme standardizovane su i metode mjerenja viskoznosti na veoma niskim temperaturama od -40° C kao i na temperaturama između tačke zamućenja i tečenja, koja je obično -20° C.

Tačka paljenja

Mjera isparljivosti i zapaljivosti ulja je tačka paljenja koja predstavlja temperaturu na kojoj se nagomilane uljne pare u smješi sa vazduhom pale uz pojavu plamena. Tačka paljenja se prema važećim propisima obavezno mjeri i kod novih

transformatorskih ulja i kod ulja iz eksploatacije. Tačka paljenja zavisi najviše od lakih frakcija ulja i veoma je osjetljiva na zagadivače kao što je benzin, pa treba obratiti posebnu pažnju na čistoću opreme za transport i skladištenje transformatorskog ulja. Tačka paljenja se ne mijenja mnogo ukoliko ulje stari pod uobičajenim pogonskim uslovima. Dozvoljeno smanjenje tačke paljenja u odnosu na početno stanje, za ulja iz eksploatacije je 15⁰ C, dok veća smanjenja zahtijevaju dodatna ispitivanja kao što je gasnrohromatografsko ispitivanje o kome će kasnije biti riječi.

Opasnost od vatre i eksplozije koja prati upotrebu mineralnog transformatorskog ulja pod pogonskim uslovima potiče sem od zapaljivosti samog ulja i od zapaljivosti gasova koji se stvaraju usljed razaranja ulja električnim lukom. To je naročito važno za ulja električnih prekidača koji imaju ulogu da gase električni luk, pa takva ulja moraju biti takvog kvaliteta da stvaraju što je moguće manje zapaljivih gasnih mješavina. Granice zapaljivosti gasova koji se razvijaju pri razaranju ulja u smjshi sa vazduhom, date su u tabeli 3.1, a tumačenje podataka je slijedeće: ako je u smješi sa vazduhom ima npr. manje vodonika od 4,1% ili više od 74,2%, smiješa se ne može zapaliti.

Tabela 3.1. Granice zapaljivosti gasovitih produkata razaranja ulja u smješi sa vazduhom

Gas	Donja granica %	Gornja granica %
Vodonik	4.10	74.20
Metan	5.30	13.90
Acetilen	2.50	90.00
Etilen	3.02	34.00
Ugljendioksid	nezapaljiv	Nezapaljiv
Ugljenmonoksid	12.50	74.20

Pored podatka o tački paljenja ulja, za sigurnost pogona kao cijeline važno je imati podatak i o uljnoj magli i kondenzovanoj uljnoj magli. Uljna magla, suspenzija ulja u vazduhu, stvara se na dva načina: kondenzovanjem zasićene uljne pare i raspršivanjem usljed isticanja ulja kroz male otvore, obično pri oštećenju suda transformatora ili prekidača. Kada magla ili kondenzovana para dođe u dodir sa zagrijanom površinom transformatorskog suda, može se razložiti na zapaljive gasove kao što su vodonik i acetilen, a ovo posebno važi za transformatore u zatvorenom prostoru gdje se lakše formira veća koncentracija zapaljivih gasova i para. Iz ovog razloga se transformatori koji se koriste u zatvorenim prostorijama , a naročito gdje postoji opasnost od požara (hemijaska industrija, industrija eksploziva i sl.) prije pune sintetičkom, nezapaljivom tečnošću, nego mineralnim uljem.

Tačka paljenja transformatorskog ulja se ispituje po metodi Pensky-Martens u zatvorenom sudu.

Tačke zamućenja i tečenja

Tačka zamućenja je temperatura na kojoj se u tečnosti, ohlađenoj pod utvrđenim uslovima, prvi put pojavi zamućenje koje potiče od kristala parafina.

Stinjavanje je zgušnjavanje tečnosti pri hlađenju i karakteriše se tačkom tečenja. Tačka tečenja je ona vrijednost temperature, izražena u $^{\circ}\text{C}$, koja se dobija kad se na vrednost temperature pri kojoj uzorak prestaje da teče, doda 3°C i pod uslovom da se hlađenje ulja vrši po definisanom standardnom postupku.

Naftenska ulja imaju daleko manji sadržaj n-parafina od ulja parafinske baze i zato su pogodnija za primjenu u hladnijim klimatskim uslovima. Pri hlađenju parafinskih ulja, n-parafini počinju da kristališu, izdvajaju se voskovi koji povećavaju viskoznost ulja i smanjuju njegovu pokretljivost, tako da nisu pogodni za primjenu u električnim prekidačima koji zahtijevaju malu viskoznost tj. nisku tačku tečenja. Savremene tehnologije za proizvodnju transformatorskih ulja omogućavaju da se i iz ulja parafinske baze proizvede ulje zadovoljavajućih niskotemperaturnih karakteristika uz upotrebu depresanta, supstance koja snižava temperature zamućenja i tečenja ulja.

Pored metode za ispitivanje tačke zamućenja i tečenja ulja, standardizovana je i metoda za ocijenjivanje osobina tečenja na niskim temperaturama mineralnih izolacionih ulja poslije starenja kojom se procijenjuje daljnja aktivnost dodatog depresanta. Za ove potrebe se vrši ubrzano vještačko starenje po standardizovanoj laboratorijskoj metodi.

Međupovršinski napon

Međupovršinski napon, σ , je mjera jačine međumolekulskih privlačnih sila na graničnoj površini dodira dvije faze ulje-voda, mjeri se na sobnoj temperaturi i izražava u mN/m.

Međupovršinski napon zavisi od prisustva polarnih jedinjenja u ulju, (za razliku od sačinitelja dielektričnih gubitaka, tg δ , koji više ukazuje na slobodne jone zagađivače ulja) i daje mogućnost otkrivanja malih koncentracija rastvorljivih polarnih zagađenja kod novih ulja i proizvoda oksidacije ulja (peroksidi i kiseline) kod ulja iz pogona. Nova transformatorska ulja bez zagađenja imaju vrijednost međupovršinskog napona od 40 do 50 mN/m, dok je vrijednost ispod 20 mN/m pokazatelj ostarijlosti ulja i upozorenje da će uskoro doći ili je već došlo do izdvajanja iz ulja oksidacionih produkata razaranja ulja kao nerastvorljivog taloga.

Ako je uzorak ulja duže vremena izložen svjetlosti ili se čuva u providnoj ambalaži dolazi do pogoršanja međupovršinskog napona i sačinitelja dielektričnih gubitaka ulja.

Gasne karakteristike

Osobine transformatorskih ulja da apsorbuju ili izdvajaju gasove, nazivaju se gasnim karakteristikama ulja i izražavaju se gasnim koeficijentom koji predstavlja mjeru brzine apsorpcije ili izdvajanja gasa pod određenim uslovima pritiska i temperature. Ako jedna vrsta ulja pod određenim uslovima apsorbuje gasove, kaže se da ima negativan gasni koeficijent, dok to isto ulje pod drugim uslovima oslobađa rastvorene gasove, kaže se da ima pozitivan gasni koeficijent. U stanju ravnoteže, pod određenim graničnim uslovima, ulje je zasićeno gasovima i tada postoji ravnoteža između gasova rastvorenih u ulju i gasova koji se nalaze iznad površine ulja.

Rastvorljivost gasa u transformatorskom ulju predstavlja količinu rastvorenog gasa u ulju kada je sistem ulje-gas u ravnoteži i zavisi od više faktora. Pošto gasovi koji se rastvaraju u ulju ne stupaju sa njim u hemijsku reakciju, to za njih važi Henrijev zakon koji glasi: "Količina nekog gasa rastvorenog u datoj zapremini neke tečnosti na datoj temperaturi srazmjerna je pritisku". Za smještu gasova važi Daltonov zakon parcijalnih pritisaka koji glasi: "U smješi gasova između kojih se ne vrši nikakvo fizičko ili hemijsko dejstvo, svaki gas vrši pritisak kao da je sam zauzeo cijeli sud a ukupan pritisak jednak je zbiru parcijalnih pritisaka svakog pojedinačnog gasa koji čine smještu". Drugi Daltonov zakon se odnosi na rastvorljivosti glasi: "Zapremina svakog gasa koji se rastvara u rastvaraču srazmjerna je njegovom parcijalnom pritisku". To praktično znači da se svaki gas u smješi prilikom rastvaranja ponaša kao da ostali gasovi nisu prisutni.

Rastvorljivost gasova u transformatorskom ulju zavisi od temperature i ona je veoma različita za razne gasove. Rastvorljivost kiseonika u ulju neznatno raste sa porastom temperature, dok rastvorljivost ugljendioksida veoma opada sa porastom temperature, tako da je rastvorljivost CO₂ na 50⁰ C duplo manja nego na 25⁰ C. On zato teži da se izdvoji iz ulja sa porastom temperature. Rastvorljivost gasa u transformatorskom ulju veoma zavisi i od vrste gasa, a zavisnosti od vrste gasa i temperature su prikazane u tabelama 3.2 i 3.3.

Pored toga rastvorljivost gasa zavisi i od viskoznosti ulja (ulja koja imaju manju viskoznost bolje rastvaraju gasove od ulja koja imaju veću viskoznost), zatim od hemijskog sastava ulja (parafini, nafteni, aromati), od prirode i intenziteta prisutnog razaranja izolacije (termičko razaranja, električn luk, korona) i dr.

Tabela 3.2. Rastvorljivost transformatorskih gasova u ulju u zavisnosti od temperature ulja

Gas	na 25 ⁰ C u % zapreminskim	Na 50 ⁰ C u % zapreminskim
Vazduh	10.8	12.7
Vodonik	5.0	7.0
Ugljendioksid	99.0	50.0
Azot	9.0	10.1
Kiseonik	14.5	15.1

Tabela 3.3. Rastvorljivost različitih gasova u transformatorskom ulju (na 760 mmHg i 25⁰ C)

Gas	% zapremine	Gas	% zapremine
Azot	8.6	Etan	280.0
Kiseonik	16.0	Etilen	280.0
Ugljendioksid	120.0	Acetilen	400.0
Ugljenmonoksid	9.0	Vazduh	10.0
Vodonik	7.0	Azot (iz vazduha)	7.0
Metan	30.0	Kiseonik (iz vazduha)	3.0

Izdvajanje gasa iz transformatorskog ulja može biti u obliku mjehurića koji izlaze iz ulja (nerastvorenog gasa u ulju) i u obliku molekula gasa (rastvorenog gasa u ulju). Usljed smanjenja gasnog pritiska u sudu iznad ulja, može doći do izdvajanja mjehurića iz ulja sve dotle dok se ponovo ne uspostavi ravnotežno stanje. Zbog loših izolacionih osobina gasa zarobljenog u obliku mjehurića u odnosu na ulje, može doći do električnog proboja, pa je zato bitno koristiti ulja koja dobro apsorbuju gasove. Kod transformatora u pogonu, osim temperaturnih promjena i promijena pritiska u sudu, pojavu mjehurića može izazvati i jaka cirkulacija ulja usljed rada uljnih pumpi i razne mehaničke vibracije. Ako pod ovim uslovima dođe i do parcijalnih pražnjenja u izolaciji transformatora, olakšava se izdvajanje gasa iz ulja (izdvajaju se ili u Buholcovom releju ili stvaraju izolacione gasne šupljine) te se stvaraju uslovi za proboj izolacije transformatora.

Metode za mjerenje rastvorljivosti gasa u transformatorskom ulju zasnivaju se na mjerenju smanjenja zapremine gasa, ili smanjenja pritiska gasa koji je bio u dodiru sa

poznatom zapreminom prethodno dobro degaziranog ulja. Razlikuju se stara Pirelli metoda koja koristi vodonik i nova Soldner-Muller metoda sa azotom.

Toplotne karakteristike

Transformatorska ulja služe istovremeno kao dielektrik, tj. izolator i kao rashladna tečnost u transformatorima, zahvaljujući njihovim toplotnim karakteristikama (specifična toplota, sačinitelj provodljivosti toplote i sačinitelj prelaza toplote).

Toplotna provodnost transformatorskog ulja pri višim temperaturama mijenja se linearno sa temperaturom, dok se kod nižih temperatura zapaža odstupanje od linearnosti, da bi u blizini tačke tečenja provodnost ulja bila znatno snižena.

Pri promijeni temperature transformatorsko ulje u izvjesnoj mjeri mijenja svoju zapreminu, a za kompenzaciju ovih promijena u energetske transformatorima služi konzervator (dilatacioni sud) a kod mijernih transformatora elastična membrana.

Veličina kojom se izražava promijena zapremine ulja sa temperaturom naziva se koeficijent toplotnog širenja, β , i izračunava se relacijom:

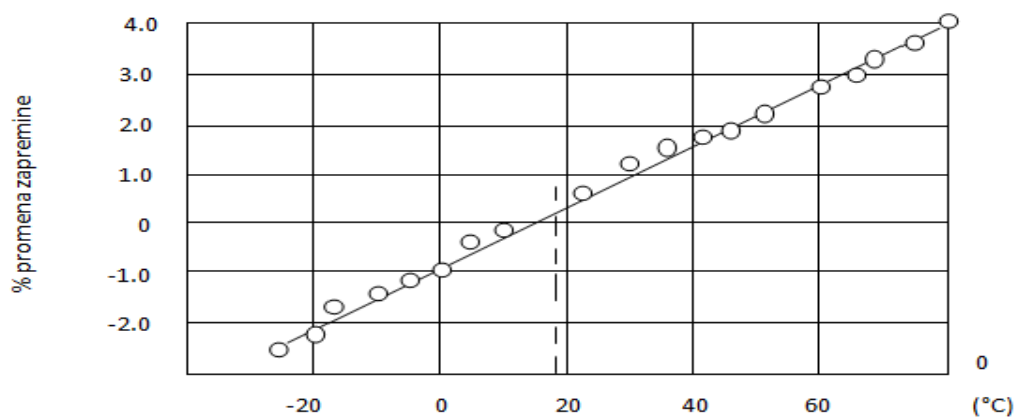
$$\beta = (S - S_1) / S (T_1 - T) \quad (3-2)$$

β - koeficijent toplotnog širenja

S - specifična težina na nižoj temperaturi

S₁ - specifična težina na višoj temperaturi

T - niža temperatura i T₁ - viša temperatura



Slika 3.4. Promijena zapremine ulja sa promjenom temperature

Optičke karakteristike

Od optičkih karakteristika transformatorskog ulja od interesa za praktičnu primjenu može da bude samo indeks prelamanja svjetlosti. Poznato je da svjetlost pri prelazu iz jedne sredine u drugu mijenja pravac svog prostiranja, što se naziva prelamanje (refrakcija) kao posljedica različitih brzina prostiranja svjetlosti u različitim sredinama (u našem slučaju na površini vazduh-ulje). Indeks prelamanja svjetlosti, n_D , je neimenovan broj i zavisi od talasne dužine svjetlosti, od temperature i od svojstva sredine kroz koju prolazi. To je iskorišteno za ispitivanje novih transformatorskih ulja radi utvrđivanja njihovog sastava, tipa ulja ali i čistoće i to na osnovu činjenice da parafinska ugljovodonici imaju nizak, a aromatski visok indeks prelamanja (naftenski su negdje u sredini). Danas se ova metoda (pomoću refraktometra) uglavnom ne koristi, osim u slučaju provjere uniformnosti isporuke novog ulja jednog istog proizvođača, gdje se pokazala kao brza i jednostavna metoda. Nova jednostavnija metoda infracrvenom spektrofotometrijom pokazala se učinkovitija za utvrđivanje grupnog sastava ulja.

3.2 Hemijske karakteristike ulja

U hemijske karakteristike ulja spadaju oksidaciona stabilnost, sadržaj inhibitora oksidacije, korozivni sumpor, sadržaj vode, sadržaj taloga nerastvorenog u n-heptanu i neutralizacioni broj. Korozivni sumpor se obavezno ispituje uglavnom kod novih transformatorskih ulja, a talog u n-heptanu kod ulja iz pogona, a prema važećim standardima, preostale hemijske karakteristike ulja se ispituju i kod novih i kod ulja iz eksploatacije.

Posljednjih godina se u hemijskim laboratorijama vrši i ispitivanje sadržaja derivata furana rastvorenih u ulju, indirektnog pokazatelja degradacije celuloze, zatim sadržaj polihlorovanih bifenila (PCB), sadržaj policikličnih aromata (PCA), stepen polimerizacije celulozne izolacije i dr.

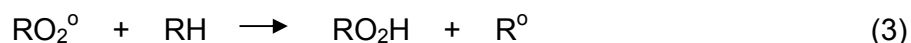
Oksidaciona stabilnost

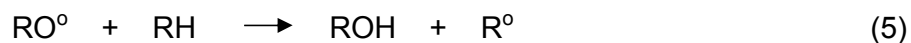
Oksidaciona stabilnost ili hemijska stabilnost transformatorskog ulja predstavlja otpornost ulja prema starenju u toku eksploatacije. Ako se uzme u obzir da vijek korištenja dobrog transformatorskog ulja treba da se poklapa sa vijekom korištenja samog transformatora, onda je razumljivo da je ova karakteristika ulja jedna od najvažnijih karakteristika za korisnike transformatora. Oksidaciona stabilnosti ulja zavisi od hemijskog sastava ulja (95-98% mješavina parafinskih, naftenskih i aromatskih ugljovodonika koji spadaju u slabo reaktivne supstance) i od uticaja kojima je ulje izloženo tokom eksploatacije. Međutim derivati ugljovodonika a naročito neki derivati aromatskih ugljovodonika su dosta reaktivne supstance.

Novе tehnologije za proizvodnju ulja sve više koriste razne dodatke kojima se poboljšavaju pojedine karakteristike ulja. Za poboljšanje oksidacione stabilnosti ulja, ulju se dodaju inhibitori (korisni aromatski ugljovodonici) oksidacije pa se zavisno od toga ulja dijele na inhibirana i neinhibirana. Međutim, dodavanjem inhibitora transformatorskom ulju ne poboljšavaju se njegove loše karakteristike, već se samo poboljšava istrajnost dobrih osobina ulja. Ukupna količina inhibitora koja se može dodati ulju je ograničena i obično iznosi od 0,3-0,4%, jer veća količina inhibitora kao i naknadno inhibiranje ulja u toku eksploatacije ne poboljšava značajno kvalitet ulja da bi to ekonomski bilo opravdano. Potrošnja inhibitora je naravno manja za ulja koja su u osnovni dobrog kvaliteta.

Dva glavna parametra utiču na oksidaciju ulja, a to su kiseonik i temperatura. Bez kiseonika nema oksidacije ulja a toplota samo pospješuje oksidaciju. Bez obzira koliko dobro ulje bilo vakumirano, uvijek zaostaje izvjesna količina rastvorenog vazduha u ulju a u svakom dobro osušenom i degaziranom transformatoru ostane od 0.05 -0.25 % kiseonika. Takođe se smatra da povećanje radne temperature ulja od svega 10⁰ C smanjuje životni vijek ulja za polovinu.

Pored ova dva parametra i drugi faktori pospješuju oksidaciju ulja kao što su katalitičko dejstvo konstrukcionih metala, posebno bakra, nečistoće kao što je voda, međuprodukti starenja ulja kao što su slobodni radikali i peroksidi koji, kad jednom otpočne proces oksidacije ulja dalje ga ubrzavaju. Kad ulje počne da oksidiše pod kataličkim dejstvom temperature i metalnih konstrukcija, kod ugljovodonika dolazi do raskidanja ugljovodoničnih veza i kao primarni produkti oksidacije se stvaraju slobodni radikali (1) koji predstavljaju nosioce lančane reakcije. Ako ništa ne zaustavi reakciju oksidacije, slobodni radikali stupaju u reakciju sa kiseonikom gradeći peroksidne radikale koji dalje sa ugljovodonicima formiraju molekule hidroperoksida (2), (3). Ovi hidroperoksidi nisu stabilni (4) i uzrokuju stvaranje novih peroksidnih radikala koji, ako ih ništa ne zaustavi, stvaraju nove slobodne radikale (5) koji nastavljaju lančanu reakciju oksidacije ulja. Završetak lančane oksidacije izazivaju molekuli inhibitora, fenolskog i aaminskog tipa, koji u reakciji sa slobodnim radikalima formiraju nestabilne molekule hidroperoksida koji se dalje razlažu na inertne molekule manje molekulske mase kao što je vodonik u reakciji (1). Oni takođe razlažu perokside na stabilnije komponente sprečavajući tako stvaranje novih radikala. Proces oksidacije ulja se znači blokira sve dok je u ulju prisutan aktivan inhibitor, prirodni ili naknadno dodat kod inhibitornih ulja. Kad se sav inhibitor utroši, proces oksidacije ulja se ubrzano nastavlja do konačne degradacije ulja i stvaranja visokomolekularnih produkata koji se kao talog nerastvoran u ulju izdvajaju iz njega.





Princip laboratorijske metode za ispitivanje oksidacione stabilnosti ulja sastoji se u starenju uzorka ulja u laboratorijskim uslovima pooštravanjem glavnih faktora koji utiču na oksidaciju ulja (pojačan protok vazduha, povećanje temperature uz prisustvo bakra kao katalizatora). Pri tome se simuliraju pogonski uslovi starenja ulja i za kraće vrijeme ulje ostari a na takvom uzorku se ispituju one karakteristike ulja koje su bitne za procijenu stanja i kvaliteta ulja iz eksploatacije. Postoji više standardizovanih metoda za procijenu oksidacione stabilnosti.

Sadržaj inhibitora oksidacije

Gotovo svi proizvođači novog, inhibiranog transformatorskog ulja u svijetu koriste za inhibitore fenolnog tipa kao što su 2,6-di-terc-butil-para-krezol (2,6 DBPC) poznat pod trgovačkim nazivom kao „topanol“ ili 2,6 di-trc-butil-fenol (DBP).

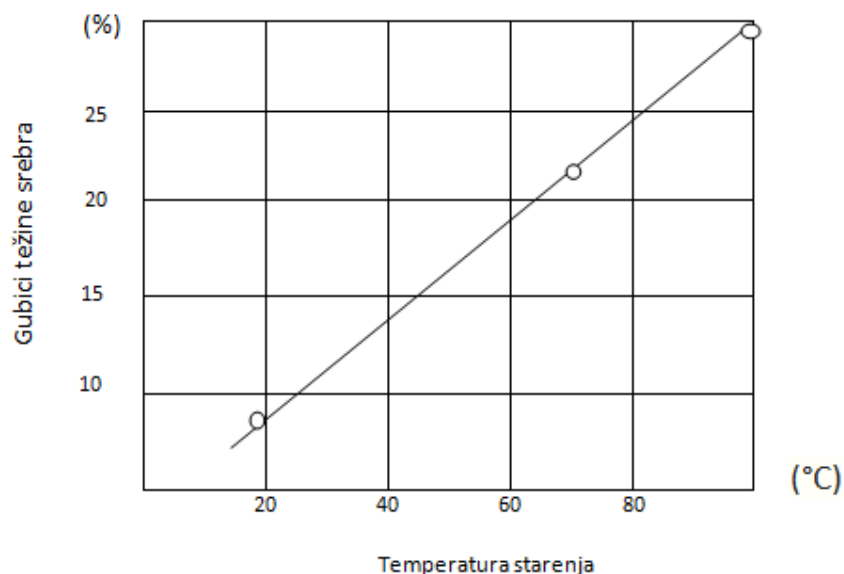
Ispitivanje prisustva inhibitora u transformatorskom ulju obavezno je kako kod novih ulja tako i kod ulja u eksploataciji. Prema osnovnom važećem standardu za nova ulja, ulje koje sadrži manje od 0,08% DBP ili DBPC smatra se neinhibiranim uljem. Ulje koje sadrži najmanje 0,15% ali ne više od 0,40% jednog ili drugog inhibitora naziva se inhibirano transformatorsko ulje. Ranije korištena vizuelna-kolorimetrijska metoda u novije vrijeme zamijenjena je ispitivanjem sadržaja inhibitora pomoću infracrvenog spektrofotometra.

Sadržaj inhibitora se redovno ispituje i kod uzoraka ulja ulja transformatora iz pogona u okviru redovne, preventivne kontrole stanja i kvaliteta ulja. Mjerenje količine zaostalog inhibitora u ulju transformatora iz eksploatacije veoma je korisno za procjenu brzine starenja pod pogonskim uslovima, što i orijentaciono omogućava procijenu brzine utroška inhibitora i budućeg ponašanja ulja pod pogonskim uslovima. Na osnovu ovog ali i ispitivanja drugih karakteristika ulja, kod transformatora na remontu, kad se vrši istakanje i obrada ulja, procijenjuje se da li je ekonomski opravdana dalja upotreba ulja u postojećem stanju, treba li mu dodatni inhibitor ili je najbolje ulje zamijeniti novim inhibiranim uljem.

Korozivni sumpor

Izolaciona ulja u transformatorima i drugoj visokonaponskoj opremi, trajno su u dodiru sa metalima koji su podložni koroziji, naročito površine bakarnih provodnika. Usljed prisustva korozivnih sumpornih jedinjenja u transformatorskom ulju dolazi do korozije metala i to u srazmjeri sa količinom i vrstom korozivnih agenasa a na to utiču temperatura i vrijeme djelovanja. Ispitivanje korozivnog dejstva sumpora i njegovih jedinjenja u laboratorijskim uslovima vrši se izlaganjem bakarne ili srebrne pločice uticaju ulja pri povišenoj temperaturi, a količina nastalih sulfida pomenutih

metala direktno zavisi od količine prisutnog korozivnog sumpora. Uticaj temperature na koroziju srebrne pločice iz ovog ispitivanja prikazan je na slici 3.5

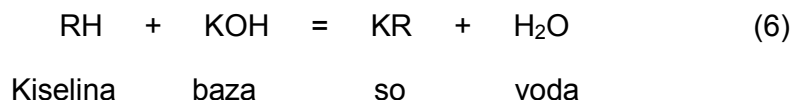


Slika 3.5. Uticaj temperature na koroziju srebrne pločice

Neutralizacioni broj

Transformatorsko ulje, ma kako dobro bilo rafinisano, po prirodi svog sastava sadrži u sebi slabe organske kiseline i njihovo prisustvo se izražava kao „organska kiselost“ i koja je posebno izražena kod ulja u pogonu (kod novih ulja je praktično zanemarljiva). Kondenzacijom organskih kiselina dolazi do stvaranja organskog mulja i taloga, te je zato bitno određivanje organske kiselosti. Eventualno prisustvo neorganskih kiselina u transformatorskom ulju je veoma štetno jer su to jake kiseline koje lako stupaju u reakciju sa konstrukcionim materijalima i izolacijom transformatora, pa se njihovo prisustvo mora svesti na minimum.

Kiselost transformatorskog ulja izražava se kao broj miligrama kalijum-hidriksida, KOH, potrebnih za neutralizaciju kiselina prisutnih u jednom gramu ulja. Broj utrošenih mg KOH se naziva neutralizacioni broj (Nb). Relacija neutralizacije kiselina sa bazom KOH se odvija po sledećoj formuli:



R je opšta oznaka za kiselinski ostatak, npr ako se radi o sumpornoj kiselini (H_2SO_4), onda R označava SO_4^{2-} grupu. Neutralizacija uzorka ulja u laboratorijskim uslovima se vrši dodavanjem baze sve do završne tačke titracije, odnosno do momenta kad je sva prisutna kiselina izreagovala sa bazom.

Pri ocjeni stepena ostarjelosti ulja iz pogona važno je pratiti promijenu vrijednosti neutralizacionog broja i uzeti u obzir i vrijeme za koje je ta vrijednost dostignuta i mora se porediti sa nekom prethodno izmjerenom vrijednošću. Na primjer, ako je kod ulja, poslije 25-30 godina eksploatacije izmjerena vrijednost od 0,20 mg KOH/g ulja, znači da je starenje ulja bilo postepeno što se može očekivati i u narednom periodu. Međutim ako je ta vrijednost nađena poslije svega 5-10 godina pogona, onda je očigledno da se radi o ulju nezadovoljavajućeg kvaliteta koje brzo stari pod pogonskim uslovima. U razaranju čvrste izolacije transformatora vrlo aktivno utiču kiseline iz ulja, tako da je izmjerena vrijednost neutralizacionog broja istovremeno i pokazatelj ostarjelosti ukupnog izolacionog sistema transformatora.

U praksi su prisutne kolorimetrijska i nova potenciometrijska metoda za određivanje neutralizacionog broja.

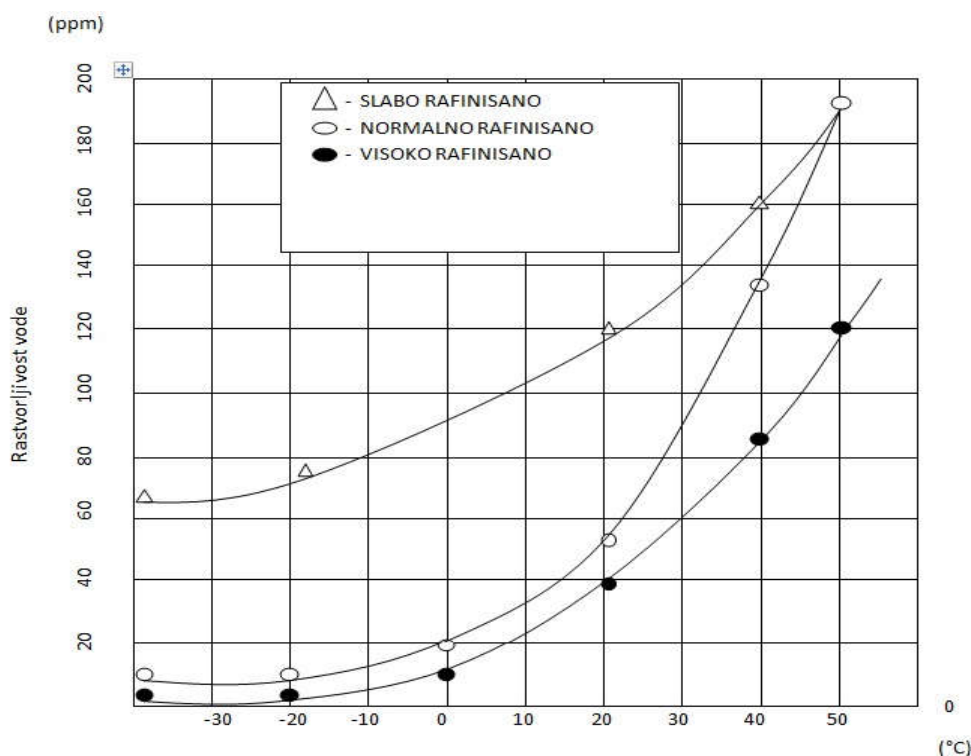
Sadržaj vode

Ispitivanje sadržaja vode u transformatorskom ulju je jedno od prioriternih ispitivanja i kod novih ulja i kod ulja iz pogona. Voda u transformatorskom ulju može biti prisutna kao hemijski vezana voda, rastvorena u ulju, emulgovana i slobodna. Prisustvo vode u transformatorskom ulju je veoma štetno i opasno, jer smanjuje dielektrična svojstva ne samo ulja već i daleko hidroskopsnije od ulja, celulozne izolacije. Najštetnija je slobodna voda koja može biti izdvojena na dnu transformatorskog suda, na elektrodama i metalnim površinama provodnika ili kondenzovana u obliku sitnih kapljica oko sitnih čvrstih čestica a naročito oko vlakancima celuloze koji plivaju u ulju stvarajući tako emulziju vode u ulju. Kombinacija vlažnih ulja sa čvrstim česticama, a naročito sa celuloznim vlakancima daje obavezno veoma nisku i nezadovoljavajuću vrijednost dielektrične čvrstoće.

Rastvorena i hemijski vezana voda u ulju manje utiče na njegova dielektrična svojstva. To je voda koja je obično nastala hemijskim procesom starenja ulja i hemijskim procesom se samo može i otkriti i ukloniti iz transformatorskog ulja. Voda koja se nalazi u transformatorskom ulju može poticati iz atmosfere kao atmosferska vlaga, kod novih ulja usljed nedovoljnog sušenja prilikom obrade ulja, a kod ulja iz eksploatacije i kao krajnji produkt oksidacije ulja. Više oksidisana ulja imaju veću sposobnost da vezuju vodu iz okoline, nego nova ulja, pa je mjerenje sadržaja vode u ulju iz eksploatacije u određenoj mjeri pokazatelj ostarjelosti samog ulja.

Rastvorljivost vode u ulju zavisi od više faktora a najvažniji je temperatura sa kojom se povećava rastvorljivost, zatim vrsta ugljovodonika koji dominiraju u ulju od

kojih naročito aromatski ugljovodonici utiču na povećanu rastvorljivost vode. Bolje rafinisana nova ulja manje za sebe vezuju vodu. Ove zavisnosti su prikazane na sl 3.6.



Slika 3.6. Rastvorljivost vode u ulju

Od vlažnosti atmosfere i sistema zaštite od atmosferske vlage (cijev sa suvim silikagelom) zavisi brzina kojom ulje vezuje za sebe vodu, dok znatna količina vode u ulju iz pogona potiče iz celulozne izolacije koja je višestruko higroskopnija od ulja.

Metoda koja se koristi za ispitivanje sadržaja ukupne vode u transformatorskom ulju je potenciometrijska titracija sa Karl-Fisherovim reagensom. Uzorak ulja se rastvara u odgovarajućem rastvaraču i u momentu kad je sva prisutna voda transformisana pomoću reagensa naziva se završna tačka titracije i određuje se potenciometrijski. Metoda je veoma osjetljiva i može da otkrije veoma malu količinu prisutne vode u ulju koja se izražava u milionitim dijelovima, mg/kg ili ppm (parts per million)

Sadržaj taloga nerastvorenog u n-heptanu

Razlikuje se takozvani nerastvoran talog u ulju (sediment) i taložljiv talog, koji je rastvoran u ulju i koji se iz ulja izdvaja dejstvom n-heptana. Nerastvoran talog je svakako nepoželjan jer smanjuje dielektričnu čvrstoću ulja (naročito uz prisustvo vode) i u većim količinama smanjuje protok ulja kroz odvodne kanale. Ovaj talog obično potiče od nedovoljnog čišćenja prije punjenja transformatora, a u toku eksploatacije od čvrstih produkata razaranja tokom vremena kao što su ugljenik,

metali, metalni oksidi i vlakanca celuloze. Taložljiv talog ispituje se samo kod ulja iz eksploatacije jer je on produkt starenja ulja i to tako što se ostarelom ulju dodaje n-heptan koji izdvaja produkte starenja iz ulja u obliku taloga ili zamućenja. Prema intenzitetu zamućenja ili količini izdvojenog taloga, procijenjuje se vrijeme za koje će se iz ulja izdvojiti produkti starenja kao nerastvoran talog u ulju. Izražava se kvalitativno (ima-nema zamućenja) ili se vrši filtriranje rastvora uzorka ulja u n-heptanu, koji se rastvara u odgovarajućoj smješi rastvarača. Na ovaj način se dobija nerastvoren talog na filtru, a drugi taložljivi talog se dobija nakon isparenja rastvarača.

Ostale hemijske karakteristike ulja

Pored gore navedenih osnovnih hemijskih osobina transformatorskih ulja, čija su ispitivanja standardizovana i obavezna, u novije vrijeme se javlja potreba za dodatnim ispitivanjima samog ulja i celulozne izolacije transformatora. Ova ispitivanja još nisu obavezna postojećim domaćim i stranim propisima i biće samo navedena.

-određivanje sadržaja derivata furana (2-furfurala) u uzorku ulja

-određivanje stepena polimerizacije celuloze

-određivanje polihlorovanih bifenila, PCB, u transformatorskom ulju

- određivanje sadržaja aromatičnih ugljovodonika u novom transformatorskom ulju

-određivanje policikličnih aromata, PCA

3.3 Električne karakteristike ulja

Da bi ulje u transformatorima ispunilo jednu od svojih osnovnih uloga, a to je da izoluje dijelove pod naponom, ono mora da ima odgovarajuće električne karakteristike. Najvažnije od tih karakteristika su električni proboj ili proboj naizmjeničnim naponom, sačinitelj ili faktor dielektričnih gubitaka, tgđ i specifična električna otpornost. Električne karakteristike ulja, čija ispitivanja inače nisu predviđene postojećim propisima ali će u doglednoj budućnosti biti obuhvaćena programom ispitivanja su: udarni napon proboja izolacionih tečnosti usljed atmosferskog pražnjenja i relativna dielektrična konstanta (permitivnost).

Električni proboj

Električni proboj (eng = Breakdown voltage) ili proboj naizmjeničnim naponom je mjera sposobnosti ulja da izdrži električni udar, izražava se u kilo voltima (kV), a jos se u praksi naziva i dielektrična čvrstoća ulja i tada se izražava u kV/cm. Napon proboja kako novog ulja tako i ulja iz eksploatacije nije mjera njegovog kvaliteta već

čistoće. Nova ulja nezadovoljavajućeg kvaliteta, kao i veoma ostarjela ulja pod pogonskim uslovima mogu imati zadovoljavajuću vrijednost napona proboja. Takođe, nova dobro rafinisana ulja zadovoljavajućeg kvaliteta ili umjereno ostarjela ulja pod pogonskim uslovima mogu imati nezadovoljavajuću vrijednost napona proboja, ukoliko u sebi sadrže nečistoće, na prvom mjestu emulgovanu vodu u kombinaciji sa čvrstim česticama i slobodnu vodu.

Električni proboj se mjeri više puta kod novih transformatorskih ulja i to u rafinerijama po završetku procesa proizvodnje ulja, u posudama u kojima se transportuje ili skladišti, u toku procesa obrade ulja sušenjem i filtriranjem u fabrici transformatora, remontnim radionicama ili na licu mjesta u pogonu neposredno prije stavljanja pod napon. Kod transformatora iz eksploatacije ova karakteristika se obavezno ispituje u okviru preventive, periodične kontrole stanja ulja transformatora iz pogona. Uzorak ulja se obično uzima sa dna transformatorskog suda gdje je vjerovatnoća da je ulje nečisto najveća. Fizičkom obradom ulja sušenjem i filtriranjem u odgovarajućim uređajima, može se relativno lako postići visoka vrijednost napona proboja i novog i ostarjelog transformatorskog ulja.

U nečistoće koje utiču na vrijednost napona proboja ulja, spadaju i mjehurići gasa, obično vazduha, ali i gasovi kvara, koji se pod uticajem jakog električnog polja joniziraju izazivajući pražnjenje na mjestima na kojima su nagomilan. Zato je važno da se impregnacija celulozne izolacije uljem vrši pod vakuumom da bi se izbjegle šupljine ispunjenje gasom.

Metode za ispitivanje napona proboja takođe su standardizovane, a u praksi se zbog dosta izraženog rasipanja rezultata, uzima srednja vrijednost 6 mjerenja.

Faktor dielektričnih gubitaka

Faktor ili sačinatelj električnih gubitaka, **tg δ** , (često se naziva i faktor snage) se obavezno mjeri i kod novih transformatorskih ulja i kod ulja iz eksploatacije. On je direktna mjera prisustva slobodnih naelektrisanih čestica, jona, koji se pod dejstvom električnog polja usmjereno kreću. Svaki dielektrik osim idealnog vakuuma posjeduje određeni broj jona. Kod dobro rafinisanih novih transformatorskih ulja, s obzirom da su zasićeni ugljovodonici i čisti aromati nepolarni, vrijednost tg δ je mala i obično je manja od 0,001 (1‰) mjereno na 90⁰C (veoma zavisi od temperature na kojoj se mjeri) i 50 do 60 Hz. Međutim njegova vrijednost veoma mnogo zavisi od prisustva primjesa koje mogu prodrijeti u ulje spolja ili nastati u samom ulju (lakovi, smole, mašinsko ulje). Sama voda u ulju ne utiče mnogo na ovu karakteristiku, ali u toku eksploatacije može da utiče na stvaranje jedinjenja visokog polariteta, koji zajedno sa nastalim peroksidima i metalnim kompleksima povećavaju dielektrične gubitke.

Kod ulja iz eksploatacije, za razliku od novih ulja, teško je odrediti gornju graničnu vrijednost za tg δ , pri kojoj treba izvršiti regeneraciju ili zamjenu ulja, pogotovo što se kod jako ostarjelih ulja kod kojih je došlo do izdvajanja taloga, često dobija niža vrijednost tg δ . Zato se procjena upotrebljivosti ulja vrši uporednim tumačenjem sa

drugim karakteristikama ulja koje su u direktnoj zavisnosti sa $\text{tg}\delta$, kao što su međupovršinski napon ulja, neutralizacioni broj i specifična električna otpornost.

Specifična električna otpornost

Specifična električna otpornost je zajedno sa faktorom dielektričnih gubitaka, dodatni pokazatelj provodnosti dielektrika usljed prisustva naelektrisanih čestica u električnom polju. Specifična provodnost je mjera proticanja električne struje usljed usmjerenog kretanja elektrona pod dejstvom električnog polja, a njena recipročna vrijednost se naziva specifična električna otpornost dielektrika, ρ , i izražava se u $\text{G}\Omega\text{m}$ ili $\Omega\text{cm} \times 10^{-12}$. Propisima je određena temperatura na kojoj se mjeri (90°C) vrijednost ispitnog napona i trenutak kad se vrši mjerenje poslije priključenja napona na elektrode.

Specifična električna otpornost transformatorskog ulja na povišenim temperaturama je obrnuto proporcionalna faktoru dielektričnih gubitaka, pa je u mnogim laboratorijama uvedeno pravilo da se na istom ulju ispituje samo jedna od ove dvije karakteristike.

Specifična električna otpornost transformatorskog ulja je veoma zavisna, više nego $\text{tg}\delta$, od provodnih nečistoća u ulju kao što su voda, lakovi smole čvrste nečistoće pogotovo vlakanca celuloze ali i oksidacioni produkti starenja ulja. Ova veličina je posebno zavisna od prisustva vlage kod novih ulja. Zadovoljavajuća vrijednost specifične električne otpornosti na 90°C i nezadovoljavajuća vrijednost na sobnoj temperaturi su pouzdan pokazatelj prisustva vlage u ulju. Propisima je data donja granična vrijednost, u zavisnosti od naponskog nivoa transformatora, koju mora da ima novo, obrađeno ulje prije stavljanja transformatora pod napon.

Relativna dielektrična konstanta (permitivnost)

Definiše se kao odnos kapacitivnosti C nekog kondenzatora sa nekim dielektrikom i kapacitivnosti C_0 istog kondenzatora ali sa vakuumom kao dielektrikom. Mineralna izolaciona ulja, kao nepolarne tečnosti, imaju relativno malu permitivnost i to im je nedostatak jer prouzrokuju neravnomjernu raspodjelu električnog polja u sistemu ulje-čvrste izolacije transformatora.

4. SINTETIČKA TRANSFORMATORSKA ULJA

Osim transformatorskih ulja mineralnog porijekla, proizvedenih iz nafte, postoje drugi tipovi izolacionih ulja sintetički proizvedenih kao što su polihlorovani bifenili (PCB), silikonska ulja i organski estri. Višestruko su skuplja od mineralnih ulja a upotrebljavaju se naročito tamo gdje postoji potencijalna opasnost od požara, kao što su hemijska industrija, metalurški kompleksi, vojna industrija, rudnici, podzemni aerodromi i sl.

Zbog velike toksičnosti PCB-a, a naročito njihovih degradacionih produkata u svijetu je već 20-tak godina zabranjena proizvodnja i tečnosti i opreme (transformatora i kondenzatora) sa PCB-om. Kao alternativa koriste se druge sintetičke tečnosti kao što su silikonska ulja, organski estri, ugljovodonici velike molekulske mase čija je glavna osobina da su manje zapaljivi od mineralnih ulja, da imaju dobre dielektrične karakteristike i nisu kancerogene.

U Srbiji je još uvijek dozvoljena, za jedno ograničeno vrijeme, upotreba postojećih transformatora sa PCB-om, a praksa je pokazala da je rizik od zagađenja najmanji sve dok su u pogonu. Skladištenje ovih pogona predstavljaju svojevrsan ekološki problem i mora mu se posvetiti posebna pažnja.

4.1 Polihlorovani bifenili (PCB) kao izolacione tečnosti

Upozorenja kojih bi se trebali pridržavati korisnici PCB transformatora mogu se svesti na slijedeća:

- upoznati osoblje koje ima kontakt sa PCB transformatorima i samom PCB tečnošću o pravilnom rukovanju i ličnoj zaštiti kao i zaštiti okoline. Uz pravilno rukovanje, štetnost se svodi na minimum;
- zabraniti svaki pokušaj zamijene PCB tečnosti drugom, zabraniti prodaju ili poklanjanje (takvih slučajeva je bilo u praksi);
- nadgledati PCB transformatore u radu, ali i svaku uskladištenu PCB tečnost i opremu kako bi se spriječilo eventualno zagađenje okoline.

U elektroprivredi Srbije nalazi se relativno mali broj PCB transformatora koji su u radu pod strogim nadzorom, dok se relativni veliki broj nalazi u industrijskim postrojenjima čije je održavanje uglavnom definisano internim propisima.

Po svom hemijskom sastavu, polihlorovani bifenili, PCB, su grupa hlorovanih aromatičnih ugljovodonika, bifenila, kod kojih je više vodonikovih atoma zamijenjeno hlorom (što je veći broj vodonikovih atoma zamijenjen hlorom to su stabilniji ali i

toksičniji). Oni su bezbojne tečnosti, karakterističnog oporog mirisa, koji djeluju na sluzokožu, nezapaljivi (za razliku od mineralnih ulja), što je i bio glavni razlog njihove upotrebe u transformatorima, teži su od vode i nerastvorni u vodi (ili vrlo malo rastvorni). Imaju malu isparljivost i veliku termičku stabilnost, a za razliku od mineralnih ulja imaju visoku relativnu dielektričnu konstantu, što je uslovalo njihovu široku primjenu i u kondenzatorima.

U hemijskom pogledu su vrlo stabilna jedinjenja, otporni su na hemijske agense kao što su kiseline, baze i oksidaciona sredstva i za razliku od mineralnih ulja, tokom eksploatacije neznatno mijenjaju svoje osnovne karakteristike. Toksični su i kancerogeni, teško se razlažu, talože se u živim organizmima i životnoj sredini. Razlikuje se hladno i toplo zagađenje okoline PCB-om. Kod transformatora pod hladnim zagađenjem podrazumijeva se izlivanje tečnosti u okolinu najčešće zbog oštećenja transformatorskog suda ili prosipanja tečnosti zbog neadekvatne manipulacije, kad manja ili veća količina PCB-a može dospjeti u zemlju ili vodu. Kod izlivanja u zemlju, 97% tečnosti se veže za zemlju, a samo 3% ispari, dok kod izlivanja u vodu, 99% jedinjenja istaloži kao teži od vode, a samo 1% ostane rastvoren u vodi. Pod toplim zagađenjem se podrazumijeva termodegeneracija PCB uz oslobađanje toksičnih proizvoda, a sve usljed havarije praćene eksplozijom i požarom u transformatoru. Pošto je PCB nezapaljiv, kod ograničenog dejstva luka, eventualno dolazi do oslobađanja samo hlorovodonične kiseline koja nagriza sud i opet se sve svodi na hladno zagađenje koje je manje opasno za ekosistem.

Glavno pitanje je svakako šta raditi sa PCB transformatorima koji su u eksploataciji pri kraju svog radnog vijeka, a sve se svodi na 3 mogućnosti:

- da se zadrži u pogonu ili u skladištu transformator sa PCB i PCB tečnost što duže dok se ne nađe najbezbjednije rješenje za odlaganje uz sve mjere zaštite;
- da se zadrži u pogonu transformator, a da PCB tečnost zamijeni sa drugim dielektrikom;
- da se zamijeni PCB transformator sa ne-PCB transformatorom.

Ispod svakog PCB transformatora u radu ili skladištu treba da postoji nepropusna kada dovoljnog kapaciteta da primi cjelokupnu količinu PCB iz transformatora, a koji bi se trebao nalaziti u posebnoj od požara zaštićenoj prostoriji sa ventilacijom. Transformator sa PCB-om ne bi trebalo preopterećavati, a električna zaštita bi brzo trebala da isključuje kvarove, da bi se eliminisala mogućnost termičkog razlaganja PCB-a. Redovna vizuelna kontrola na curenje je neophodna.

Zamijena PCB-a drugom tečnošću ima smisla samo poslije trajne dekontaminacije transformatora (ispiranjem dobijamo još veću količinu kontaminirane tečnosti), a tu je i problem da se nađe dielektrik približno istih karakteristika.

Zamijena PCB transformatora sa ne-PCB transformatorom nije lak zadatak prije svega zbog rizika od požara, a često rješenje su i suvi transformatori klase H.

Na osnovu gore navedenog i dalje ostaje dilema šta raditi sa ostarjelim PCB transformatorom, čak i ako se u dogledno vrijeme nađe rješenje za samu PCB tečnost. Zagađeni transformator se ne može tek tako pomiješati sa običnim industrijskim otpadom, a za sada je razrađeno više postupaka za spaljivanje i PCB tečnosti i cijelih transformatora i kondenzatora. Pored spaljivanja, velike nade se polažu u biodegradaciju PCB pomoću aerobnih i anaerobnih bakterija, a sve je još u fazi intenzivnog istraživanja.

4.2 Silikonska ulja

Po svom hemijskom sastavu, silikonske izolacione tečnosti su sintetički izolacioni polimeri silicijuma, čije fizičke karakteristike zavise od njihove molekulske mase. Sa povećanjem molekulske mase raste viskoznost, a smanjuje se isparljivost i termička provodljivost tečnosti. U tabeli 4.1 su uporedno date bitne fizičke i hemijske karakteristike silikonskih i mineralnih ulja koja se preporučuju po IEEE (eng = Institute of Electrical and Electronic Engineers) standardima.

Tabela 4.1. Uporedne fizičke i hemojske karakteristike silikonskih i mineralnih ulja

Karakteristika	Metoda	Mineralno ulje	Silikonsko ulje
Probojni napom (kV)	IEC 60156	≥ 30	≥40
Tangens ugla gubitka na 90°C	IEC 60247	<0.005	<0.001
Gustina na 20 °C (kg/dm ³)	ISO 3675	≤0.895	0.955-0.970
Tačka stinjanja (°C)	ISO 3016	≤-30	≤-50
Međupovršinski napon (mN/m)	ISO 6295	40	20.8
Viskoznost (mm ² /s) na 40°C	ISO 3104	≤16.5	40=4
Sadržaj vode (mg/kg)	IEC 60814	≤30	50
Tačka paljenja (°C)	ISO 2719	≥140	>240
Tačka zapaljivosti (°C)	ASTM D-92	160	371

Silikonska ulja, kad se koriste kao transformatorska, imaju izvjesne prednosti ali i nedostatke u odnosu na mineralna ulja, a to se ogleda u :

- silikonska ulja imaju veću otpornost od požara nego mineralna ulja što je veoma značajno sa aspekta zaštite opreme od potencijalnog požara pa su stoga adekvatna zamijena polihlorovanim bifenilima;

- silikonska ulja imaju veću dielektričnu konstantu od mineralnih transformatorskih ulja;
- viskoznost silikonskih ulja je veća nego mineralnih, ali zato imaju manju ukupnu toplotnu provodljivost nego mineralna ulja;
- maksimalna količina vode koju silikonsko ulje može da sadrži je veća od vrijednosti kod mineralnih ulja (koja iznosi 50ppm), pa je neophodno sušenje i filtriranje silikonskih ulja prije sipanja u transformator, a često i u toku eksploatacije;
- silikonska ulja, za razliku od mineralnih, su otporna na oksidaciju i ne zahtijevaju češću kontrolu u toku eksploatacije;
- silikonska ulja su manje toksična od mineralnih i ne spadaju u zagađivače ekosistema.

5. STANDARDIZACIJA IZ OBLASTI TRANSFORMATORSKIH ULJA

Standardizacija tečnosti (fluida) za elektrotehničku primjenu se radi na međunarodnom nivou u Međunarodnoj elektrotehničkoj komisiji, IEC, u okviru komiteta IEC/TC 10. Standardi koji se koriste u zemljama Evrope pa i šire su međunarodni standardi IEC i ISO, a standardi u Srbiji su praktično prevodi međunarodnih standarda obilježeni pod istim brojem kao JUS/IEC. Izdvajaju se 3 osnovna standarda kao prioritetna u ispitivanju transformatorskih ulja:

- standard za procjenu kvaliteta novih transformatorskih ulja mineralnog porijekla koji se koristi pri ispitivanju novih transformatorskih ulja;

- standard za nadgledanje ulja transformatora iz eksploatacije koji se koristi prilikom ispitivanja uzoraka ulja u okviru preventivne, periodične kontrole stanja i kvaliteta ulja transformatora iz pogona;

- standard za procjenu ispravnosti transformatora iz pogona na osnovu gasnohromatskog ispitivanja uzoraka ulja i gasova Buholcovog releja.

U okviru IEC u toku je revizija većine standarda iz oblasti transformatorskih ulja, a posebno gore navedenih osnovnih standarda, poslije koje slijedi i revizija odgovarajućih nacionalnih JUS standarda. U tabeli 9.1 prikazan je spisak trenutno važećih nacionalnih JUS standarda, standarda međunarodne organizacije IEC i ISO i nekih nacionalnih stranih standarda iz oblasti uljai i papirne izolacije.

Tabela 5.1 Uporedni prikaz standarda za transformatorska ulja i papirnu izolaciju

JUS	IEC	ISO,ASTM,IP,DIN
JUS IEC 50 (212)/1991 Izolacioni čvrsti materijali , tečnosti i gasovi – Termini i definicije	IEC 50(212)/1990 International electrotechnical vocabulary. Chapter 212 : Insulating solids , liquids and gases.	
JUS IEC 1039/1994 Fluidi za elektrotehničke primene. Opšta klasifikacija izolacionih tečnosti.	IEC 1039/1990 General classification of insulating liquids. HD 61851/1992	
JUS IEC 1100/1994 Fluidi za elektrotehničke svrhe.Klasifikacija izolacionih tečnosti prema tački gorenja i donjoj toplotnoj vrednosti.	IEC 1100/1992 Classification of insulating liquids according to fire-oint and net calorific value EN 61100	
JUS IEC 60422/1994 Upustvo za nadzor i održavanje mineralnih izolacionih ulja u elektrotehničkoj opremi	IEC 60422/2003 Fluids for electrotechnical application – Unused mineral insulating oils for transformers and	

	switchgear	
JUS IEC 60422/1994 Upustvo za nadzor i održavanje mineralnih izolacionih ulja u elektrotehničkoj opremi	IEC 60422/1989 Supervision and maintenance guide for mineral insulating oils in electrical equipment	
JUS ISO 8068/1994 Naftni proizvodi i maziva. Naftna maziva ulja za turbine (kategorije ISO-L-TSA i ISO-L-TGA)		ISO 8068/1987 Petroleum products and lubricants – petroleum lubricating oils for turbines (categories ISO –L-TSA and ISO-L-TGA specification)
JUS IEC 1099/1996 Fluidi za elektrotehničke primene. Specifikacije za nekorišćene sintetičke organske estere namnjene za elektrotehničke svrhe	IEC 1099/1992 Specification for unused synthetic organic esters for electrical purposes EN 61099/1992	
JUS B.H3 566/1986 Tečni dielektrici – Postupak uzimanja uzorka		
JUS IEC 60567/1996 Upustvo za uzimanje uzoraka gasova i ulja iz električnih uređaja punjenih uljem za analizu slobodnih rastvorenih gasova	IEC 60567/1992 Guide for sampling of gasses and oil from oil-filled equipment and for the analyses of free and dissolved gases	
JUS B.H8.015/1986 Nafta i naftni proizvodi- Određivanje gustine pomoću areometra		ISO 3675/1976 Petroleum products.Determination of density.Hdrometer method ISO 12185 Crude petroleum and petroleum products.Determination of density. Oscillating U-tube method
JUS B.H8.415/1988 Određivanje sadržaja aromatičnih ugljovodonika u mineralnim izolacionim uljima	IEC 60590/1977 Determination of the aromatic hydrocarbon content of new mineral insulating oils	
JUS B.H3.567/1992 Metoda određivanja antioksidacionih aditiva u izolacionim uljima za elektrotehniku.Određivanje DBPC pomoću infracrvene spektrofotometrije	IEC 60666/1979 Detection and determination of specified anti-oxidant additives in insulating oils	
JUS N.A5.014/VIII/1970 Utvrđivanje dielektrične čvrstoće izolacionih ulja	IEC 60156/1995 Insulating liquids – Determination of the breakdown voltage at power frequency – Test method	

<p>JUS B.H8.022/1981 Određivanje kinematičke viskoznosti i providnih i neprovidnih tečnosti i izračunavanje dinamičke viskoznosti</p>		<p>ISO 3104/1994 Petroleum products – Transparent and opaque liquids- Determination of kinematic viscosity and calculation of dynamic viscosity ASTM D 445/97</p>
<p>JUS IEC 61868 Mineralna izolaciona ulja. Određivanje kinematičke viskoznosti na vrlo niskim temperaturama</p>	<p>IEC 61868/1998 Mineral insulating liquids. Determination of kinematic viscosity at very low temperatures</p>	
<p>JUS B.H8.066/1990 Naftni proizvodi-Određivanje boje</p>		<p>ISO 2049/1996 Petroleum products – Determination of colour. ASTM D 1500</p>
<p>JUS ISO 4263/ 1994 Naftni proizvodi . Inhibirana mineralna ulja- Određivanje oksidacionih karakteristika</p>		<p>ISO 4263/1986</p>
<p>JUS N.A5.0 15III/1972 Postupci utvrđivanja permitivnosti i faktora gubitka električnog izolacionog materijala na industrijskim , zvučnim i radiofrekvencijama uključujući i metarske talasne dužine</p>	<p>IEC 60247 Measurement of relative permittivity ,dielectric dissipation factor and d.c. resistivity of insulating liquid IEC 61620 Insulating liquids – Determination of the dielectric dissipation factor by measurement of the conductance and capacitance – Test method</p>	
<p>JUS N.A8.252/1990 Celulozni papir za elektrotehničke svrhe</p>	<p>IEC 554-3-1/1979</p>	
<p>JUS ISO 6295/1996 Određivanje međupovršinskog napona između ulja i vode sa prstenom</p>		
<p>JUS B.H8.232/1981 Izolaciona ulja za elektrotehniku.Metoda određivanja korozivnog sumpora</p>		<p>ISO 5662/1978 Electrical insulating oils.Method for detection of corrosive sulphur DIN 51353</p>
<p>JUS IEC 60897/1996 Fluidi za elektrotehničke primene. Metode za određivanje udarnog napona proboja izolacionih tečnosti usled atmosferskih pražnjenja</p>	<p>IEC 60897/1987 Methods for the determination of the lightning impulse breakdown voltage of insulating liquids</p>	
<p>JUS IEC60 997/1994 Fluidi za elektrotehničke svrhe.Određivanje polihlorovanih bifenila (PCB) u</p>	<p>IEC 60997/1989 Determination of polychlorinated biphenyls (PCB's) in mineral insulating oils</p>	

<p>mineralnim izolacionim uljima gasnom hromatografijom sa punjenom kolonom</p>	<p>by packed column gas chromatography (GC) IEC 61619 Insulating liquids –Contamination by polychlorinated biphenyls (PCB'S) -Method of determination by capillary column gas chromatography</p>	
<p>JUS IEC 61065/1996 Fluidi za elektrotehničke primene. Metoda ocenjivanja osobina tečenja na niskim temperaturama mineralnih izolacionih ulja posle starenja</p>	<p>IEC 61065/1991 Method for evaluating the low temperature flow properties of mineral insulating oils after ageing EN 61065/1993</p>	
<p>JUS 61125/1996 Fluidi za elektrotehničke primene. Neupotreblijvane izolacione tečnosti na bazi ugljovodonika. Metode za ispitivanje oksidacione stabilnosti</p>	<p>IEC 61125/1992 Unused hydrocarbon-based insulating liquids-test methods for evaluating the oxidation stability EN 61125/1993</p>	
<p>JUS ISO 2719/1991 Naftni proizvodi i maziva. Određivanje tačke paljenja u zatvorenom sudu. Metoda po Penski-Martensu.</p>		<p>ISO 2917/1988 Petroleum products and lubricants – Determination of flash point- Pensky-Martens closed cup method.</p>
<p>JUS IP 346 Određivanje sadržaja PCA u nekorišćenim baznim uljima i naftnim fracijama bez asfaltena. Metoda ekstrakcije dimetil-sulfoksidom i određivanje indeksa prelamanja</p>		<p>IP 346/1992 Determination of polycyclic aromatics in unused lubricating base oils and asphaltene free petroleum fractions –Dimethyl sulphoxide extraction refractive index method.</p>
		<p>ISO 14596/1998 Petroleum products – Determination of sulfur content – Wavelength-dispersive X-ray fluorescence spectrometry</p>
<p>JUS ISO 3016/97 Nafta i naftni proizvodi . Određivanje tačke tečenja</p>		<p>ISO 3016/1994 Petroleum products – Determination of pour point.</p>

	IEC 61198/1993 Mineral insulating oils – Method for the determination of 2 – furfural and related compounds	
	IEC 60814 Insulating liquids-Oil-impregnated paper and pressboard-Determination of water by automatic coulometric Karl Fischer titration	
	IEC 60628 Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization	
	IEC 62021-1/2003 Insulating liquids-Determination of acidity – Part 1:Automatic potentiometric titration	
JUS IEC 60599/1994 Interpretacija analiza gasova u transformatorima i drugoj uljem punjenoj električnoj opremi	IEC 60599/1999 Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis	

6. NOVA TRANSFORMATORSKA ULJA

Ulje u transformatoru treba da traje koliko i sam transformator i od presudne je važnosti da prvo punjenje ovog transformatora bude sa novim uljem dobrog kvaliteta i dobro obrađeno sušenjem i filtriranjem. Ako se za prvo punjenje upotrebi ulje nezadovoljavajućeg kvaliteta ili nedovoljno dobrog kvaliteta, njegove karakteristike će biti dobre izvjesno vrijeme, približno 10 godina, koliko iznosi i garantni rok transformatora, pa problem kvaliteta ulja ostaje korisniku transformatora. Ulje lošeg kvaliteta pod pogonskim uslovima ubrzano stari, produkti starenja ulja zagađuju celulozu aktivnog dijela transformatora, nataloženi produkti starenja u kanalim kod transformatora sa prinudnom cirkulacijom otežavaju hlađenje, transformator se pregrijava, jednom riječju skraćuje se njegov životni vijek.

6.1 Izbor novog transformatorskog ulja

Novo transformatorsko ulje se koristi za nalivanje novih transformatora, za dolivanje potrebne količine ulja transformatora iz pogona kao i za zamijenu ostarjelog ulja kod transformatora iz pogona prilikom njihove revizije ili opravke. Novo ulje dobrog kvaliteta mora da zadovolji, na prvom mjestu, kriterijume definisane u važećim JUS i IEC standardima za nova ulja i da odgovara vrijednostima datim u propratnom atestu proizvođača ulja, ukoliko takav postoji.

U laboratorijama za ispitivanje novog transformatorskog ulja razlikuju se dva pristupa :

-ispitivanje novog transformatorskog ulja koje se po prvi put susreće na tržištu i sa kojim se nema ni laboratorijskog ni pogonskog iskustva. U tom slučaju se pristupa *tipskom ispitivanju ulja*. Ispituju se sve karakteristike ulja prema važećim JUS i IEC propisima za nova transformatorska ulja, a posebna pažnja se posvećuje ispitivanju oksidacione stabilnosti ulja koja je najvažnija karakteristika ulja sa stanovišta njegovog budućeg ponašanja pod pogonskim uslovima.

- ako se ispituje uzorak novog transformatorsko ulja već poznatog i u praksi već provjerenog kvaliteta i proizvođača i ako je u laboratoriji ranije već zadovoljilo tipsko ispitivanje, pristupa se *skraćenom postupku ispitivanja*. To praktično znači da se ispituju one fizičke, hemijske i električne karakteristike ulja koje su bitne za procjenu upotrebljivosti ulja kao novog i one indentifikacione karakteristike ulja koje ukazuju da se radi o ulju već provjerenog kvaliteta tipskim ispitivanjem. Tipsko ispitivanje, a naročito ispitivanje oksidacionih karakteristika traje veoma dugo, nekoliko nedelja, pa ispitivanje po skraćenom postupku ima svoje opravdanje pogotovo kad je neophodno što prije nabaviti novo ulje.

Ukoliko rezultati ispitivanja uzorka ulja zadovoljavaju kriterijume kvalitete za sve ispitane karakteristike, daje se izvještaj sa rezultatima ispitivanja pojedinačno svake karakteristike ulja uporedno sa vrijednostima definisanim u postojećem, važećem standardu za nova ulja. Izvještaj sadrži takođe i mišljenje o kvalitetu ulja i preporuku za njegovu upotrebu. Rezultati tih ispitivanja se koriste kao početne vrijednosti za dalju kontrolu transformatorskog ulja u okviru periodične, preventivne kontrole stanja i kvaliteta ulja transformatora iz eksploatacije. Izdvojićemo primjer sadržaja vode u novom ulju, čija granična vrijednost za transformatore naponskog nivoa 220kV iznosi 10 ppm (mg/kg ulja), a za transformatore iz 110 kV i 35 kV mreže iznosi 20 ppm.

Zahvaljujući ovakvom pristupu ispitivanja kvalitet novih transformatorskih ulja u zadnjih 30-ak godina na domaćem tržištu su nabavljana ulja visokog kvaliteta, uglavnom inhibirana sa visokom vrijednošću dielektrične čvrstine i ostalih karakteristika, koja pokazuju da ulja postepeno i normalno stare pod pogonskim uslovima.

6.2 Rukovanje uljima i uzimanje uzoraka ulja

Nova transformatorska ulja se isporučuju u drumskim ili željezničkim cisternama i buradima ili u novim transformatorima. Neophodno je da se nova transformatorska ulja skladište, čuvaju i transportuju u novim, specijalizovanim cisternama i buradima za nova ulja, prethodno dobro očišćenim, osušenim i propisno zatvorenim. Ulje mora biti zaštićeno od spoljašnjih zagađenja kao što je vlaga, čvrste nečistoće, ali i od zagađenja od samih posuda, čiji unutrašnji zidovi moraju biti premazani bojama otpornim na ulje (to se naravno odnosi i na sva crijeva i cijevi za punjenje i pretakanje). U slučaju zagađenja novih transformatorskih ulja sa motornim uljima, uljima za prenos toplote, korištenim transformatorskim uljima, sredstvima za podmazivanje, itd, dolazi do trajnog zagađenja i nikakvi naknadni postupci sušenja i filtriranja ne mogu poboljšati njihov kvalitet. Do ovoga lako može da dođe ako se ne koriste cisterne i buradi za transport samo novih transformatorskih ulja.

Prilikom skladištenja novog ulja u cisternama preporučuju se silikatni dehidratori koji izvlače vlažnost iz vazduha koji ulazi u cisternu. Drugi način je da se preko ventila za ograničenje pritiska poveže izvor suvog azota ili suvog vazduha koji se uduvava kroz ulje.

Kad se novo transformatorsko ulje isporučuje u buradima (zapremine 205 litara, sa 200 litara ulja), u kojima se obično i skladišti, posebnu pažnju treba obratiti na način transporta i skladištenja buradi. Da bi se izbjeglo vlaženje ulja iz atmosfere ili propuštanje vode na otvorima, kojih ima dva sa zatvaračima, burad se moraju skladištiti i transportovati naopačke ili horizontalno tako da zatvarači budu potopljeni u ulje sve do njihove upotrebe. Praksa je pokazala da prije upotrebe ulja iz buradi

obavezno provjeriti vrijednost dielektrične čvrstoće, a ako ona nije zadovoljavajuća, izvršiti sušenje ulja.

Kad se ulje isporučuje u novim transformatorima, problem čuvanja ulja od spoljnjih zagađenja se svodi uglavnom na zaštitu od atmosferske vlage. Kod velikih transformatora, iznad površine ulja se obično nalazi suv azot ili neki inertni gas pod pritiskom, koji sprečava prodiranje atmosferskog vazduha u transformator. Kod manjih transformatora, zaštita se uglavnom vrši preko silikagelskih cijevi napunjenih suvim silikagelom koji apsorbujući vlagu štite ulje, a time i ukupni izolacioni sistem transformatora.

Uzimanje uzoraka novih ulja za ispitivanje njihovog kvaliteta vrši se po postupku standardizovanom u JUS standardu koji je u skladu sa odgovarajućim IEC propisom. U njemu su detaljno opisani postupci za uzimanje uzoraka iz cisterni (uzima se jedan uzorak) i buradi, kao i broj uzoraka iz buradi po principu slučajnog izbora, te opis odgovarajuće posude za uzimanje i dostavljanje uzorka ulja do laboratorije. Pokazalo se da je najbolje ispitivanje vršiti na licu mjesta, sipajući ulje direktno u ćeliju uređaja za ispitivanje. Za ispitivanje svih fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja potrebna količina uzorka je oko 2 litre ulja.

6.3 Obrada ulja sušenjem i filtriranjem

Kad se kod dostavljenog uzorka novog transformatorskog ulja izmjeri nezadovoljavajuća vrijednost dielektrične čvrstoće koju obično prati i visoka vrijednost ukupnog sadržaja vode u ulju, vrši se sušenje ulja vakuum-filtriranjem pomoću laboratorijske opreme za sušenje ulja. Dugogodišnja praksa je pokazala da se, pridržavajući se standardizovanog postupka za obradu ulja u laboratorijskim uslovima, dobijaju uvijek zadovoljavajući rezultati obrađenog uzorka (dielektrična čvrstoća iznad 250 kV/cm a sadržaj vode ispod 10ppm).

6.4 Rezultati ispitivanja

Ulja parafinske baze

Mineralna izolaciona transformatorska ulja predstavljaju mješavinu naftenskih, parafinskih i aromatskih ugljovodonika od kojih su za kvalitet ulja najodgovorniji pojedini tipovi aromatskih ugljovodonika. U zavisnosti od sastava osnovne sirovine iz koje se proizvodi ulje i dominacije naftenskih ili parafinskih ugljovodonika, dobijamo i ulja naftenske ili parafinske baze, a njihova osnovna razlika je ponašanje na niskim temperaturama ispod 0°C. Na temperaturam nižim od -40°C parafinska ulja prelaze u

voskasto stanje i povećava im se viskoznost, dok to nije slučaj kod naftenskih ulja. Stvaranje voskastih formi se izbjegava ili dubokom deparafinacijom trafo baze (dobijaju se ulja slična naftenskim), ili dodatkom odgovarajućih aditiva depresanata tačke stinjanja.

U početku su se transformatorska ulja proizvodila isključivo iz naftenske nafte, ali kako su njene zalihe u svijetu ograničene, 80-ih godina se pristupilo detaljnom ispitivanju alternativnog izvora a to je sirova nafta sa parafinskom osnovom. Pitanje kvalitete ulja parafinske baze kod nas u okruženju je postalo aktuelno od kako je Rafinerija „Modriča“ iz Modriče počela proizvodnju domaćeg transformatorskog ulja tip „TRAFOMOL-SPECIJAL“ parafinske baze. Rezultati izvršenih ispitivanja na su pokazali da ulje zadovoljava sve kriterijume kvaliteta postojećeg JUS propisa za nova transformatorska ulja izuzev tačke tečenja (stinjanja) koja je bila -35°C , što je iznad vrijednosti definisane standardom od -45°C . Međutim, s obzirom na naše klimatske uslove, ova vrijednost je tolerisana.

Na osnovu dugogodišnjih ispitivanja raznih laboratorija ulja parafinske baze došlo se do slijedećih zaključaka:

- Kvalitet parafinskih ulja kao i neftenskih prvenstveno zavisi od optimalnog sadržaja aromatskih ugljovodonika koji su zajednički za oba tipa ulja. Ulja koja imaju manji sadržaj aromata (od 4-10%) manje apsorbuju gasove, znači i kiseonik, pa imaju bolju oksidacionu stabilnost. To znači da je stepen oksidisanosti ulja prvenstveno funkcija sadržaja aromata i količine kiseonika, a ne odnosa parafina i naftena. To isto važi i za gasne karakteristike ulja. U zavisnosti kakvo se ulje želi postići pravi se kompromis između oksidacione stabilnosti ulja i njegove gas-adsorpcijskih karakteristika;

- Starenje papira takođe ne zavisi od uljnih smješa a stepen razlaganja lak žice je rezultat kontaminacije vodom, nastale razaranjem papira. Nisu zapažene razlike u dielektričnim svojstvima papira impregnisanog naftenskim odnosno parafinskim uljem ili njihovom mješavinom;

- Nisu zapažene nikakve promjene električnih karakteristika transformatora (gubici ili parcijalna pražnjenja), što su potvrdili i rezultati periodičnih ispitivanja transformatora sa parafinskim i naftenskim uljima. Transformatori su bili izloženi ubrzanom starenju pod naponom od 1,85 puta većem od njihovog nazivnog napona, u trajanju od 1650 časova, što odgovara preko 25 godina pod normalnim pogonskim uslovima. Na kraju perioda starenja nije bilo nikakvih modifikacije niskotemperaturnih karakteristika parafinskih ulja (tačke tečenja);

- Ispitivanja su pokazala da nema poremećaja električnih karakteristika parafinskih ulja na niskim temperaturama u blizini tačke zamucenja i da ove osobine ne mogu štetno da utiču na ponašanje transformatora stavljenog pod napon. I u ovom slučaju nema bitnih razlika između parafinskih i naftenskih ulja, a takođe i sadržaj vlage u ulju poslije višestrukog proboja ulja je približno isti za obe vrste ulja.

Oksidaciona stabilnost ulja

Pored dielektrične čvrstoće, najvažnija osobina ulja je svakako hemijska ili oksidaciona stabilnost, čija se ispitivanja ubrajaju u najvažnija za krajnje korisnike transformatora. U tabeli 6.3 prikazani su rezultati laboratorijskog ispitivanja na 8 uzoraka novih ulja, 4 inhibirana (uzorci 2,3,5 i 8) i 4 neinhibirana (uzorci 1,4,6 i 7), po metodi IEC 61125 A, B i C. Pored ispitivanja oksidacione stabilnosti uzorka ulja, izvršena su ispitivanja sadržaja inhibitora i grupnog sastava ulja metodom infracrvene spektrofotometrije, IR.

Tabela 6.3 Uporedna ispitivanja oksidacione stabilnosti i grupnog sastava 8 uzoraka novih ulja

Br. Uz.	DBPC	IEC1125C						IEC 1125 B	IEC 1125 A		P/N/A
		Traj. testah	SA, mg KOH/g	VA, mg KOH/g	TA, mg KOH/g	talog % m/m	I.P., h	I.P., H	SA, mg KOH/g	talog % m/m	C _a /C _p /C _n %m/m
1	-	164	0,30	0,36	0,65	0,16	<48	/	0,07	0,00	5,2/63/31,8
2	0,32	500	0,37	0,70	1,07	0,80	370	144	-	-	8,7/47,2/44,1
3	0,42	500	0,02	0,05	0,07	0,02	>500	>270	-	-	7,8/49,7/42,5
4	-	164	0,34	0,48	0,82	0,18	24	-	0,37	0,06	6,3/63,6/30,1
5	0,29	500	0,11	0,06	0,18	0,04	>500	162	-	-	9,1/46,9/44
6	-	164	0,23	0,37	0,60	0,10	<48	-	-	-	9,3/39,3/50,8
7	-	164	1,92	1,60	3,52	0,894	<24	-	3,99	2,22	12,8/50,8/36,7
8	0,30	500	0,05	0,06	0,12	0,03	>500	268	-	-	8,0/50,2/41,8

Napomena :

DBPC - 2,6 di-tercijarni butil p-krezol (inhibitor oksidacije)

SA, VA, TA - rastvorljiva, isparljiva, ukupna kiselost

LP - indukcioni period

C_A, C_P, C_N - ukupan sadržaj aromatičnih, parafinskih i naftenskih atoma

Metoda A je stara metoda IEC 74 za neinhibirana, metoda B je stara metoda IE C 474 za inhibirana ulja. Metoda C je za obe vrste ulja i izvodi se tako što se u uzorak ulja u prisustvu bakarne spirale, uvodi vazduh konstantnim protokom od 0,15 l/h na temperaturi od 120⁰C u toku 164 časa za neinhibirana ulja i u toku 500 časova za inhibirana ulja. Step en oksidacije se određuje mjerenjem isparljive kiselosti,

rastvorljive kiselosti i taloga, a kao dodatno ispitivanje može se kod inhibiranih ulja određivati indukcionni period ili vrijeme utroška inhibitora.

IEC standard predlaže da granična vrijednost za ukupnu kiselost, koja predstavlja zbir isparljive i rastvorljive kiselosti, iznosi 1,2 mg KOH/g ulja max, a talog 0,8% m/m max uz dodatak da nacionalni komiteti mogu uvesti niže granične vrijednosti u skladu sa zahtjevima, primjenom i praksom.

Inhibirana ulja 2,3,5 i 8 zadovoljavaju kriterijume kvaliteta ispitivanjem po objema metodama B i C, a najbolji rezultat ima uzorak br. 3, a zatim uzorci 8,5 i 2. Od neinhibiranih ulja, uzorak br. 1 zadovoljava kriterijume kvaliteta po metodama A i C, uzorak br. 6 ima vrijednosti ispitanih karakteristika izvan graničnih, uzorak br. 4 ima vrijednosti blizu graničnih, dok uzorak br. 7 neizadovoljava kriterijume kvaliteta zbog daleko viših vrijednosti od graničnih. Metoda C daje svakako najobjektivniju sliku o kvalitetu i inhibiranih i neinhibiranih transformatorskih ulja.

Rezultati strukturno grupne analize, dobijeni metodom infracrvene spektrofotometrije, pokazuju da kod 8 uzoraka ulja porast masenog udjela aromatskih jedinjenja baznog ulja uzrokuje smanjenje oksidacione stabilnosti ulja. Najbolju vrijednost ispitanih karakteristika imaju uzorci ulja sa niskim sadržajem aromatskih C atoma (uzorci br. 1 i br. 3), dok najlošije rezultate testa ima uzorak br. 7 sa najvišim sadržajem aromatskih jedinjenja.

Sadržaj vode

Vlažnost novog transformatorskog ulja se ispituje mjerenjem dielektrične čvrstoće ulja i ukupnog sadržaja vode u ulju prije i poslije vakuum filtriranjem i sušenjem uzorka ulja u laboratorijskim uslovima i prije i poslije vakum filtriranja i sušenja ulja u fabrici transformatora, remontoj radionici ili na licu mjesta u pogonu. U tabeli 6.4 prikazani su rezultati ispitivanja sadržaja vode metodom Karl-Fishera prije i poslije vakuum filtriranja i sušenja uporedo sa rezultatima ispitivanja njihove dielektrične čvrstoće. Prvih 5 uzoraka ulja su uzorci ispitani u toku samog procesa sušenja ulja jednog energetskog transformatora na licu mjesta u pogonu, a proces sušenja je trajao dok nisu dobijene zadovoljavajuće vrijednosti obe karakteristike (uzorak br. 5). Preostali uzorci su nova ulja isporučena u buradima, vlažna i neizadovoljavajućih karakteristika, a poslije sušenja njihove mješavine dobijene su zadovoljavajuće karakteristike sadržaja vode i dielektrične čvrstoće.

Tabela 6.4 Rezultati ispitivanja sadržaja vode kod novih ulja, prije i nakon filtriranja

Redni broj	Oznaka uzoraka	Sadržaj vode, Ppm	Diel. Čvrstoća, kV/cm
1	1 prije filtriranja-jedna šarža	46,0	60
2	1 poslije filtriranja	16,1	250
3	2a pre filtriranja – druga šarža	52,3	80
4	2b tokom filtriranja	33,0	250
5	2c nakon obrade	8,1	300
6	3a Bure 1	44,7	56
7	3b Bure 2	49,8	83
8	3c Bure 3	59,2	75
9	3d Bure 1 + 2 + 3 Posle filtriranja	12,8	250

7. TRANSFORMATORSKA ULJA IZ POGONA

Ulja energetskih transformatora iz prenosne visokonaponske mreže (110 kV i iznad), transformatora iz 35 kV, transformatora iz termo i hidro elektrana i industrijski postrojenja zahtijevaju preventivnu, periodičnu kontrolu stanja i kvaliteta u toku eksploatacionog ciklusa. Mjerni transformatori zbog svoje konstrukcije sa elastičnom membranom koja štiti ulje od spoljašnjih uticaja vlage i kiseonika iz vazduha, ne zahtijevaju česte periodične kontrole. Njihovo ulje praktično ne mijenja svoje početne karakteristike dugi niz godina pod pogonskim uslovima.

Za ispitivanje karakteristika ulja transformatora iz eksploatacije u okviru preventivne, periodične kontrole uzima se po jedan uzorak ulja iz donjeg nivoa transformatorskog suda. Samo u slučajevima kad se ne dobiju zadovoljavajuće vrijednosti dielektrične čvrstoće ulja, predlaže se provjera ispitivanjem iz sva tri nivoa.

„Uputstvo za nadzor i održavanje mineralnih izolacionih ulja u električnoj opremi“ predstavlja standard JUS/IEC60422/1994 kojim su usklađenje: grupe kvaliteta ulja (4 grupe sa svojim graničnim vrijednostima karakteristika), vrste ispitivanja kao i učestalost uzimanja uzoraka ulja pri ispitivanju. Uzorci ulja transformatora iz pogona, u okviru preventivne kontrole, uzimaju se i ispituju u zavisnosti kojoj grupi kvaliteta pripada ali i u zavisnosti od veličine i značaja transformatora za elektroenergetski sistem. Veći i skuplji transformatori kao i transformatori koji zauzimaju važna mjesta u elektroenergetskom sistemu svakako zahtijevaju češću kontrolu.

7.1 Stanje ulja transformatora iz pogona

Na fizičke, hemijske i električne karakteristike ulja transformatora u eksploataciji utiču, pored kvalitete samog ulja, niz faktora koji mijenjaju stanje i kvalitet ne samo ulja već i ukupnog izolacionog sistema transformatora. To su na prvom mjestu spoljašnji uticaji (atmosfera vlaga i kiseonik iz vazduha), nečistoće zaostale u transformatoru ili nastale uslijed prisutnog kvara (gasovi, čestice uglja, metala, vlaknaca celuloze i dr.), radna temperatura ulja i namotaja, električna polja i pojave u vezi sa njima (parcijalna pražnjenja, električni luk), katalitičko dejstvo konstrukcionih metala (bakra, gvožđa, aluminijuma) i dr. Najčešće, većina ovih faktora utiče istovremeno, mijenjajući vrijednosti pojedinih fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja i jednim imenom to se naziva *radni uslovi eksploatacije ulja transformatora u pogonu*.

Pod normalnim radnim uslovim, većina karakteristika ulja kao što su dielektrična čvrstoća i većina fizičkih karakteristika (gustina, viskoznost, gasne i niskotemperaturne karakteristike ulja) se ne mijenjaju. Za razliku od njih, neke

električne karakteristike (tg δ , specifični električni otpor), zatim fizičke karakteristike kao što je međipovršinski napon ulje-voda i većina hemijskih karakteristika ulja (kiselost, sadržaj taloga nerastvorenog u n-heptanu, sadržaj vode rastvorene u ulju, sadržaj inhibitora kod inhibiranih ulja) postepeno se mijenjaju. Ulja koja postepeno i normalno stare pod pogonskim uslovima trebala bi imati vijek trajanja kao i sami transformatori, a to je 30-40 i preko 40 godina neprekidne eksploatacije, što je u velikom broju slučajeva potvrdila i dugogodišnja praksa.

Osnovno pitanje koje se postavlja pri kontroli transformatora iz pogona je da li ulje u postojećem stanju zadovoljava za dalju upotrebu u datom transformatoru? Odgovor se dobija najprije na osnovu izmjerenih vrijednosti dielektrične čvrstoće i ukupnog sadržaja vode u ulju koje ukazuju na vlažnost ne samo ulja nego i ukupnog izolacionog sistema transformatora. Ove karakteristike omogućuju da ulje vrši svoju funkciju dielektrika i sredstva za odvođenje toplote. Da bi se spriječila ubrzana pogoršanja ovih karakteristika neophodno je pravilno održavanje dehidracionih cijevi sa silikagelom ili nekim drugim dehidratorom i redovne preventivne kontrole ove dvije karakteristike.

Brzina promjene karakteristika transformatorskog ulja određuje se redovnim ispitivanjem i poređenjem sa prethodno izmjerenim vrijednostima i tako približno procjenjuju njihove buduće promijene, odnosno budući vijek transformatorskog ulja. Tako se planiraju buduće intervencije i odlučuje o tome da li će se postojeće ulje moći još koristiti uz fizičku obradu sušenjem i filtriranjem, ili će se vršiti dolivanje novog ulje ili vršiti njegovu regeneraciju pomoću inhibitora i adsorbenata.

Pravilno uzimanje uzoraka je neophodan uslov da bi ispitivanje ulja transformatora bilo korektno, jer uzorak treba da reprezentuje stanje ulja u transformatoru. Uzorak od 2l je dovoljan za kompletno ispitivanje karakteristika ulja, za ispitivanje dielektrične čvrstoće dovoljna je boca od 1l, a za ispitivanje ukupnog sadržaja vode potreban je čist i suv špric, koji bolje čuva uzorak od atmosfere vlage nego boca. Uzorak se uzima dok je transformator u radu, na radnoj temperaturi, a ispituje u laboratoriji na sobnoj temperaturi.

Na osnovu rezultata ispitivanja fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja iz eksploatacije i postojećih kriterijuma za njihovu procjenu, datih u važećim standardima JUS i IEC za ulja iz pogona, ulja dijelimo u 4 grupe kvaliteta. Date grupe kvaliteta razlikuju se prema vlažnosti i ostarjelosti ulja i mjerama koje se trebaju preduzeti na uljima te učestanosti ispitivanja u okviru periodične kontrole.

7.2 Rezultati ispitivanja ulja iz pogona

U slučaju dugogodišnje redovne, preventivne kontrole stanja i kvaliteta uzoraka ulja transformatora iz pogona, moguće je pratiti stvarnu promjenu karakteristika ulja

pod pogonskim uslovima i porediti sa rezultatima ispitivanja uzoraka ulja tih istih transformatora kada su bila nova i laboratorijski vještački starena. Ilustracije radi, u tabeli 7.3 dati su rezultati ispitivanja uzoraka ulja iz 10 transformatora iz pogona, inhibiranih i neinhbiranih, različitih proizvođača, uslova i godina eksploatacije

Tabela 7.3 Rezultati ispitivanja ulja transformatora iz pogona

R br.	Diel. čvrst. kV/cm	tg δ 90°C 10 ⁻³	Inhibitor	Talog u n-heptanu	Neut. br.mg KOH/g	Površ. Napon mN/m	God. ispitivanja	God. pogona od	God. regeneracije	Grupa Kval.
1	89	62,0	nema	ima	0,19	18,69	1981	1958	-	III
	245	68,1	"	"	0,28	17,09	1985	"	1958	II
	208	25,7	ima	nema	0,08	22,17	1995		-	I
2	245	16,2	nema	nema	0,01	31,40	1975	1970	-	I
	246	28,5	"	"	0,07	18,34	1975	-	-	I
3	233	5,0	ima	nema	0,02	34,00	1975	1965	-	I
	>250	3,7	ima	"	0,07	28,54	1995	-	-	I
4	>250	11,5	nema	nema	0,02	29,00	1977	1971	-	I
	>250	84,8	"	"	0,07	22,58	1995	-	-	I
5	>250	50,5	nema	ima	0,19	18,02	1987	1971	1987	III
	>250	17,8	ima	nema	0,06	23,47	1995	-	-	I
6	240	19,7	nema	nema	0,02	34,00	1975	1970	-	I
	>250	41,4	"	"	0,04	26,24	1995	-	-	I
7	>250	7,8	ima	ima	0,00	42,00	1976	1976	-	I
	>250	2,3	"	"	0,02	34,65	1995	-	-	I
8	240	10,8	nema	nema	0,00	30,70	1975	1975	-	I
	245	43,0	"	ima	0,19	17,19	1984	-	1984	III
	233	16,2	ima	nema	0,04	28,34	1993	-	-	I
9	>250	20,4	nema	nema	0,03	25,00	1977	1975	-	I
	240	94,4	"	ima	0,22	16,96	1985	-	1986	III
	>250	92,3	ima	nema	0,09	23,60	1995	-	-	I
10	>220	197,1	nema	ima	0,09	20,90	1974	1960	-	III
	240	206,7	"	"	0,20	20,50	1983	-	1985	III
	>250	190,7	ima	nema	0,12	21,26	1995	-	-	III

Ukoliko je u transformatoru prilikom prvog punjenja upotrebljeno ulje dobrog kvaliteta, bez obzira da li je neinhbirano (ulje br. 2, 4 i 6) ili inhibirano (ulje br. 3 i 7) ono taj kvalitet zadržava duži niz godina sa tom razlikom što se kod neinhbiranih ulja karakteristike počinju postepeno pogoršavati već od prve godine pogona. Kod inhibiranih ulja za svo vrijeme pogona karakteristike ulja se neznatno mijenjaju dok je prisutan aktivan inhibitor, koji za sebe vezuje produkte starenja.

Ulje pod rednim brojem 1 je primjer ulja koje je ostarjelo poslije dugogodišnje eksploatacije, znači da je u osnovi bilo dobrog kvaliteta. Prvo mjerenje loše vrijednosti dielektrične čvrstoće je po pravilo posljedica neodgovarajućeg uzimanja uzorka, što se provjerava ponovnim ispitivanjem na licu mjesta. Poslije regeneracije dobijeno je ulje koje je i poslije 10 godina eksploatacije u zadovoljavajućem stanju. Ulja pod rednim brojem 5,8 i 9 su za relativno kratko vrijeme eksploatacije dostigla vrijednosti ulja grupe kvaliteta III, što znači da su ulja još kao nova bila lošeg kvaliteta, a od takvih ulja se ne može očekivati da se regeneracijom dobije kvalitetno ulje (primjer ulja br. 9). Efikasnost regeneracije ulja zavisi i od toga da li je ona izvršena na vrijeme (ulje br. 8) ili se sa njom zakasnilo (ulje br. 10).

U tabeli 7.4 prikazani su rezultati ispitivanja sadržaja vode u uzorcima ulja 6 energetskih i 6 mjernih transformatora iz pogona. Za energetske transformatore dati su i rezultati uporednih ispitivanja njihove dielektrične čvrstoće i pripadajuće grupe kvaliteta. Kao što se vidi iz priložene tabele, ulja energetskih transformatora I grupe kvaliteta, kao i ulja većine mjernih transformatora imaju mali i zadovoljavajući sadržaj vode u ulju. Samo je kod mjernog transformatora br. 6 izmjeren veći sadržaj vode od granične vrijednosti od 30ppm za ulja mjernih transformatora iz pogona. Kod ulja energetskih transformatora III grupe kvaliteta zapaža se da pri relativno većem sadržaju vode u ulju, ulja imaju dobru dielektričnu čvrstoću. Ta voda je očigledno produkt i pokazatelj ostarjelosti ulja uz ostale produkte starenja, bolje se rastvara u starim uljima nego u novim i ne utiče na smanjenje njihove dielektrične čvrstoće sve dok je u rastvorenom stanju. Kod ulja redni br. 3 i 6 sadržaj vode je iznad granične vrijednosti od 40ppm date za ulja energetskih transformatora iz pogona i prouzrokuje smanjenje njihove dielektrične čvrstoće.

Tabela 7.4 Sadržaj vode kod ulja energetskih i mjernih transformatora iz pogona

Redni Broj	Sadržaj vode kod mernih transformatora, ppm	Sadržaj vode kod energetskih transformatora, ppm	Diel.čvrst. kV/cm	Grupa kvaliteta
1	8	6	>250	I
2	9	14	>250	I
3	5	59	143	II
4	8	29	>250	III
5	5	36	220	III
6	40	51	122	IV

7.3 Obrada transformatorskih ulja iz pogona

Ukoliko su rezultati ispitivanja jedne ili više karakteristika ulja transformatora iz pogona nezadovoljavajući, u zavisnosti od rezultata ispitivanja odnosno od pripadnosti ulja odgovarajućoj grupi kvaliteta, korisniku transformatora se predlaže koje mjere i kada treba preduzeti za sanaciju stanja transformatorskog ulja a preko njega i ukupnog izolacionog sistema transformatora. Pri tome se razlikuju slijedeći postupci:

- zamjena ostarjelog ulja novim uljem
- fizička obrada ulja sušenjem i filtriranjem
- dodatak inhibitora inhibiranim uljima utrošene količine inhibitora
- obrada ulja adsorbentima i inhibiranjem
- hemijska obrada ulja rerafinacijom i inhibiranjem

Zamijena ulja novim uljem

Zamijena ulja novim uljem preporučuje se uglavnom kod ulja IV grupe kvaliteta koja su toliko ostarjela pod pogonskim uslovima da se njihov kvalitet ne može poboljšati hemijskom obradom adsorbentima i inhibiranjem, što se provjerava obradom i ispitivanjem uzorka ulja u laboratorijskim uslovima. Pri tome se uzima u obzir starost samog transformatora i njegov planirani budući radni vijek kao i ekonomska opravdanost upotrebe novog ulja u starom transformatoru. Ako je ulje bilo i vlažno, tada posebnu pažnju treba obratiti na sušenje i ispiranje aktivnog dijela transformatora čija je celulozna izolacija takođe ovlažena. Preporučuje se dobro ispiranje aktivnog dijela transformatora prvo zagrijanim starim uljem koje dobro rastvara vodu, a zatim izvjesnom količinom novog ulja treba dobro isprati transformator od ostataka starog ulja, pa tek onda puniti sistem novim uljem. Ako uslovi dozvoljavaju može se izvršiti posebno sušenje celulozne izolacije u za to specijalizovanim pećima. Nakon nalivanja transformatora novim uljem, a prije njegovog stavljanja pod napon, preporučuje se dostavljanje uzorka ulja na kompletnu analizu, radi provjere kvaliteta i dobijanja početne vrijednosti karakteristika koje se porede tokom buduće preventivne periodične kontrole.

Fizička obrada ulja sušenjem i filtriranjem

Fizička obrada ulja sušenjem i filtriranjem preporučuju se uglavnom kod ulja II grupe kvaliteta koja nisu ostarjela ili su umjereno ostarjela pod pogonskim uslovima pa se ekonomski smatra opravdanim njihova dalja eksploatacija. Savremeni uređaji za ovu metodu koriste vakuum filtriranje ulja pri čemu se osim vode i mehaničkih primjesa iz ulja otklanjaju i rastvoreni gasovi, vazduh ali i transformatorski gasovi nastali degradacijom izolacije. Fizičkom obradom ulja se otklanjaju samo nečistoće koje nisu rastvorene u ulju kao što su voda, slobodna i emulgovana, gasovi i čvrste nečistoće. Rastvorene nečistoće u ulju kao što je rastvorena i hemijski vezana voda, kao i rastvoreni u ulju produkti starenja se ne mogu fizičkom obradom ukloniti, zato

se kvalitet ulja III grupe kvaliteta koja su ostarijela dugogodišnjom eksploatacijom, ne može poboljšati ovom metodom.

Poslije završetka obrade ulja ovom metodom preporučuje se kao i kod novih ulja, uzimanje i ispitivanje uzorka ulja prije stavljanja transformatora pod napon, a takođe i ispitivanje uzorka na sadržaj vode. Veći sadržaj vode se koji se toleriše poslije obrade ulja iz pogona u odnosu na nova ulja, potiče od rastvorene i hemijski vezane vode nastale kao produkt starenja ulja pod pogonskim uslovima, a koje nema kod novih ulja.

Dodatak inhibitora ulju iz pogona

Samo kod inhibiranih ulja može se vršiti dodatak inhibitora ulju u pogonskim uslovima, a većina ulja u našem okruženju inhibirana je istom vrstom inhibitora, 2,6 ditercijerni-butyl-para-krezolom, (2,6DBPC). U toku eksploatacije inhibitor se troši vezujući za sebe produkte starenja ulja tako da praktično inhibirana ulja neznatno stare pod pogonskim uslovima. Mjereći kvantitativno brzinu utroška inhibitora redovnim, periodičnim ispitivanjem uzoraka ulja, moguće je na vrijeme, prije nego se utroši sav inhibitor, intervenirati dodatkom nove, odgovarajuće količine istog inhibitora. Svakako to treba prethodno provjeriti ispitivanjem uzoraka ulja u laboratorijskim uslovima (prije svega provjera oksidacione stabilnosti), pa tek onda pristupiti inhibiranju ulja u pogonu.

U slučajevima isključenja transformatora uslijed kvara i opravke, kad se svakako mora istakati i obrađivati ulje ili u fabrici ili u pogonu i kada se razmatra da li isto ulje i dalje treba koristiti, predlaže se da se obavezno uz ostala ispitivanja izvrši i ovo ispitivanje i predloži odgovarajući tretman u zavisnosti od dobijenih rezultata. Važno je napomenuti da je inhibitor relativno jeftin i da se ulju dodaje relativno mala ukupna količina inhibitora, od 0,3 – 0,4 %.

Regeneracija ulja adsorbentima i inhibiranjem

Za potrebe Elektroprivrede Srbije sredinom 80-tih godina prošlog vijeka započela je hemijski obrada ulja adsorbentima i inhibiranjem. Pod adsorbentima podrazumijevamo materijale koji se odlikuju povećanim stepenom poroznosti i u stanju su da vrše procese adsorpcije iz različitih sistema. Najpoznatiji među adsorbentima su silicijum dioksid, silikagel (SiO_2) i posebna vrsta adsorbenta, zeoliti koji mogu biti prirodni ili sintetički, čija je mikroporoznost uslovljena strukturom samih minerala (šupljine i kanali reda nekoliko nanometara). Veoma je širok spektar materijala u prirodi ili vještački proizvedenih koji se mogu koristiti za obradu ulja kao adsorbenti. To su, pored navedenih, razne gline kao što je meka i praškasta Fulerova zemlja, ili tvrda (boksiti).

Poboljšanje kvaliteta ostarjelih ulja regeneracijom adsorbentima zavisi od stepena ostarjelosti ulja i adsorpcione sposobnosti adsorbenta, pa je neophodno laboratorijskim ispitivanjima utvrditi regenerativnu sposobnost ulja i potrebnu količinu

adsorbenta za rad u pogonskim uslovima. Količina upotrebljenog adsorbenta trebala li biti što manja da bi i gubitak ulja zbog vezivanja sa adsorbentom bio što manji. Jedno tipično ispitivanje ulja regeneracijom adsorbentom prikazano je u tabeli 7.5, gdje su ispitivani uzorci 6 vrsta ulja ostarjelih pod pogonskim uslovima prije i poslije obrade u istim laboratorijskim uslovima sa istom vrstom i količinom adsorbenta od 10% masenih. Na dnu tabele su kriterijumi za procjenu kvaliteta i predstavljaju granične vrijednosti ulja I grupe kvaliteta.

Ulja A,B i C su originalna punjenja transformatora u neprekidnom pogonu, ulje A oko 25, ulje B oko 20, a ulje C oko 10 godina. Preostala 3 ulja su ulja kojima su zamijenjena stara ulja i neprekidno su u pogonu ulja D i E oko 6, a ulje F oko 3 godine. Primjenjujući kriterijum da kvalitet regenerisanog ulja treba da bude jednak ili približno jednak kvalitetu novog, neupotrebljavanog ulja, vidi se da jedino ulje C može da se smatra nepodesnim za regeneraciju koja je ekonomski opravdana. Ovo ulje je i kao novo bilo nezadovoljavajućeg kvaliteta, jer je poslije svega 10-12 godina eksploatacije postalo praktično neupotrebljivo. Regeneracijom se iz ulja odstranjuju produkti starenja i samo od ulja koja su kao nova bila dobrog kvaliteta, regeneracijom se može dobiti ulje takođe relativno dobrog kvaliteta. Ulja A i B se mogu uspješno regenerisati, ali uz upotrebu relativno veće količine adsorbenta (10% i više) a ulja preostala 3 uz upotrebu manje količine materijala (do 5% pa i manje kod ulja F).

Da bi regenerisano ulje adsorbentima zadržalo svoj dobar kvalitet duže vremena pod pogonskim uslovima, treba da ima dobru oksidacionu stabilnost, zato se regenerisana ulja moraju obavezno inhibirati poslije obrade adsorbentima bez obzira da li je ulje prije obrade bilo bilo inhibirano ili neinhibirano. Naime, adsorbent pored toga što za sebe vezuje produkte starenja ulja, vezuje i inhibitor u izvjesnoj mjeri.

Uređaj VH-312 za regeneraciju transformatorskih ulja (slika 7.2) je dio osnovnog uređaja VH-120 proizvodnje „MICAFLUID AG“ za filtriranje i vakuum sušenje. U zavisnosti od toga da li transformatorski sud izdrživ na vakuum ili nije, razlikuju se dva postupka regeneracije ulja i to:

- „Paralelan“ režim rada kada se čisto regenerisano ulje prebacuje u posebnu čistu i suhu cisternu pri čemu se ne miješa sa uljem u transformatorskom sudu koje još nije regenerisano, a transformator se stavlja pod vakuum i vrši sušenje aktivnog dijela transformatora;

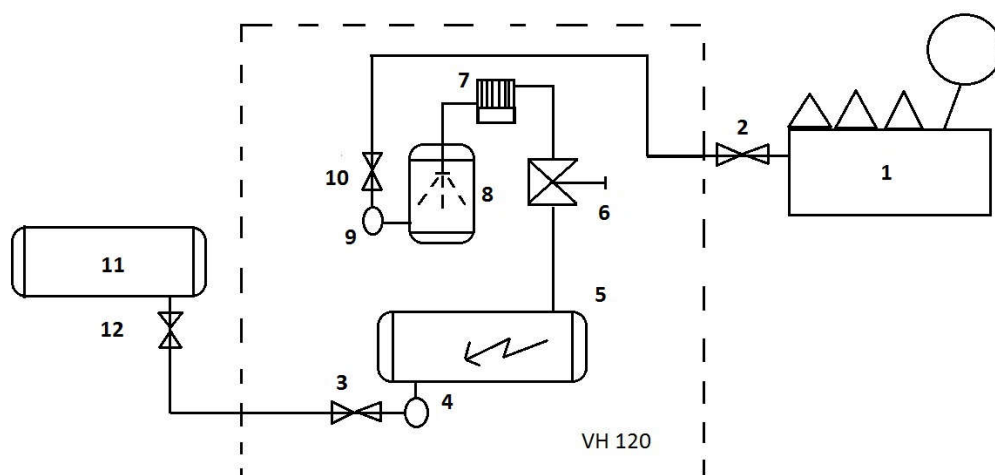
- „Kružni“ režim u kome se čisto regenerisano ulje miješa sa postojećim neregenerisanim uljem u transformatorskom sudu, što je šematski prikazano na slici 7.1.

Tabela 7.5 Rezultati ispitivanja uzoraka ulja pre i posle regeneracije sa 10%

Karakteristika ulja						
Red br.	Oznaka uzroka	Tgδ 90°C (°/oo)	Spec. el. otpor 90°C (ohm.cm.10 ¹²)	Neutral. broj (mgKOH/g)	Površinski napon (mN/m.10 ⁻³)	Talog u n-heptanu
1	A	119,0	0,15	0,20	17,74	Ima
	Ar	0,9	27,07	0,02	38,24	Nema
2	B	82,2	0,28	0,11	22,27	Ima
	Br	5,0	67,85	0,01	40,71	Nema
3	C	115,5	0,16	0,22	16,20	Ima
	Cr	7,2	8,38	0,03	25,90	u tragovima
4	D	63,9	0,47	0,13	22,65	Ima
	Dr	3,6	49,22	0,02	42,64	Nema
5	E	338,3	0,10	0,05	22,28	ima
	Er	1,2	87,28	0,01	34,62	Nema
6	F	37,7	0,73	0,05	28,34	Nema
	Fr	2,2	89,17	0,01	43,59	Nema
Kriterijum Kvaliteta		<5,0	>10,00	<0,03	>30,00	Nema

adsorbenta

Napomena: Malo (r) uz slovo označava isto ulje poslije regeneracije



Slika 7.1 Regenerativni proces ulja u „kružnom“ režimu rada

Brojevi na slici 7.1 predstavljaju: 1) transformator, 2) ispustni ventil, 3) ulazni ventil, 4) zupčasta pumpa, 5) grijači, 6) „bay pass“ ventil, 7) fini filter, 8) komora za degazaciju, 9) centrifugalna pumpa, 10) izlazni ventil, 11) cisterna, 12) ventil za pražnjenje



Slika 7.2 Uređaj VH-312 za regeneraciju transformatorskih ulja firme MICAFLUID AG

Iskustvo je pokazalo, što je potvrđeno i laboratorijskim ispitivanjima, da se bolji efekti regeneracije ulja postižu pri dvostepenom ili trostepenom korišćenju adsorbenta, tj od npr. predviđenih 20% adsorbenta da se koristi dva puta po 10% ili 3 puta po 7% adsorbenta. Po završetku regeneracije i sušenja ukupne količine ulja, ulje se inhibira propuštanjem kroz dio uređaja sa inhibitorom i prema potrebi još jednom osuši prije sipanja u transformator. Pošto adsorbent vezuje za sebe izvjesnu količinu ulja koja iznosi oko 40% u odnosu na količinu upotrebljenog materijala, to je istu potrebno nadoknaditi dolivanjem novog ili regenerisanog ulja uz poštovanje pravila mješanja. Po završetku svih radova uzima se uzorak ulja za laboratorijsko ispitivanje efikasnosti obrade ulja u pogonu i za dobijanje početnih vrijednosti karakteristika ulja potrebnih za dalju preventivnu kontrolu ulja u pogonskim uslovima.

Hemijska obrada ulja rerafinacijom i inhibiranjem

Ovaj postupak se uglavnom vrši kod ulja IV grupe kvaliteta koja su toliko ostarjela pod pogonskim uslovima da se ne može poboljšati njihov kvalitet prethodno opisanim

postupcima. To su ulja kod kojih se produkti starenja već izdvajaju kao talog nerastvoran u ulja, na dnu boce sa uzorkom ulja, tj. na aktivnom dijelu transformatora i na dnu samog transformatorskog suda.

Postupak rerafinacije korištenih transformatorskih ulja iz eksploatacije podrazumijeva duboku rafinaciju otpadnog, više neupotrebljivog ulja i dobijanje ulja sa karakteristikama novog ulja. Postupci koji se pri tome koriste su isti kao i postupci rafinacije vakuum destilata (već opisan u poglavlju 2). To su vakuum destilacija ostarjelih ulja, solventna ekstrakcija i/ili hidrogenovanje (obrada vodonikom) i na kraju finalna obrada adsorbentima i inhibiranjem. Na taj način se dobija ulje kvaliteta koje zadovoljava sve zahtijeva novog transformatorskog ulja. U tabeli 7.6 su prikazani rezultati ispitivanja 4 uzorka ostarjelih ulja prije i poslije rerafinacije, a za uzorak br. 1 su poređenja radi dati i rezultati obrade tog istog ulja adsorbentima i inhibiranjem. Kao što se vidi, dobijena su ulja koja zadovoljavaju kriterijume kvaliteta vašćih JUS i IEC standarda za nova transformatorska ulja

Tabela 7.6 Rezultati rerefinancije i regeneracije starog ulja

Isptine Karakteris.	Staro Ulje 1	Rege n TUF 1	Re raf. 1	Staro ulje 2	Re raf. 2	Staro Ulje 3	Re raf. 3	Star o ulje 4	Re Raf. 4	JUS B.H3 561
Neutral. br mgKOH/g	0,08	0,02	0,00	0,08	0,01	0,04	0,00	0,10	0,00	≤ 0,03
Međup.nap. mN/m	19	32	40	22	46	30	46	23	45	≥ 40
Talog u n-hept. Kvalitativno	ima	nema	nema	Ima	nema	nema	Nema	ima	Nem a	-
Tg δ 90 °C ‰	63,9	8,2	1,0	310,0	3,2	52,2	1,1	50,3	8,1	≤ 5
Spec.el.otpor 90 °C, G, Ω m	3,2	18,5	1425,0	0,80	1096	23,7	593,7	5,9	89,1	-
Dielek.čvrst, kV/ cm	146	-	>250	80	>250	50	>250	167	270	≥ 240
Ind.period, H	/	65	285	/	336	/	288-300	/	155-160	≥ 120

8. MIJEŠANJE TRANSFORMATORSKIH ULJA

Potreba međusobnog miješanja transformatorskih ulja često se susreće u praksi, a najčešće u slučaju dolivanja izvjesne količine novog ili regenerisanog ulja transformatora iz eksploatacije. Zahvaljujući mnogobrojnim ispitivanjima ulja i njihovih mješavina od strane domaćih i stranih laboratorija, preporukama JUS i IEC standarda, postavljena su pravila o miješanju transformatorskih ulja, a ona se ukratko sastoje u slijedećem:

1. Mineralna transformatorska ulja proizvedena iz nafte međusobno se mogu miješati u svim odnosima bez obzira da li se radi o inhibiranim i neinhibiranim uljima, naftenske ili parafinske baze, novim ili ostarjelim uljima u toku eksploatacije i to po slijedećim kriterijumima:

- ako se pravi mješavina inhibiranih i neinhibiranih ulja, takvu mješavinu treba posmatrati, ispitivati i procjenjivati prema kriterijumima za neinhibirana ulja a posebno oksidacionu stabilnost mješavine;

- ako se pravi mješavina transformatorskih ulja naftenske i parafinske baze, mješavinu treba posmatrati i procjenjivati kao ulje parafinske baze a posebno niskotemperaturnu karakteristiku takve mješavine;

- ako se pravi mješavina novog ulja i ulja iz eksploatacije, takvu mješavinu treba ispitivati i procjenjivati prema kriterijumima postavljenim za ulja transformatora iz eksploatacije.

2. Nova ulja i ulja iz eksploatacije različitog tipa i kvaliteta namijenjena za upotrebu u transformatorima treba čuvati i upotrebljavati odvojeno kad god je to moguće.

3. Ulja namijenjena za upotrebu u električnim prekidačima treba posebno čuvati i upotrebljavati samo u prekidačima prema uputstvu proizvođača prekidača. Ne dozvoljava se miješanje ulja iz prekidača sa transformatorskim uljima bez obzira koliko je ulje iz prekidača prethodno bilo dobro obrađeno.

4. Nove transformatore, naročito veće jedinice, treba prvenstveno puniti novim uljem jednog tipa, prethodno laboratorijski provjerenog kvaliteta, a po mogućnosti i u praksi njegovom dugogodišnjom eksploatacijom. Ukoliko je ipak neophodno novom transformatoru dodati izvjesnu nedostajuću količinu novog ulja drugog tipa, proizvođača i kvaliteta, tada se postupa na slijedeći način:

- novom ulju kod novog transformatora može se dodati do 5% novog ulja drugog tipa i proizvođača bez prethodnog ispitivanja ponašanja mješavine pod uslovom da se radi o mineralnom ulju koje zadovoljava zahtjeve postojećih JUS i IEC standarda za nova ulja;

- ukoliko se dodaje veća količina od 5%, neophodno je dobijenu mješavinu uporedo ispitati i sa obe komponente miješanja, a miješanje će biti moguće ukoliko sve ispitane karakteristike mješavine nisu lošije od rezultata lošije komponente miješanja;

- bez ispitivanja se može u opremi nižeg naponskog nivoa upotrebiti mješavina ulja prethodno ispitana i namijenjena za upotrebu u opremi većeg naponskog nivoa.

5. Dolivanje novog ulja ulju transformatora iz eksploatacije do 5% se može vršiti bez ikakvih problema i ispitivanja mješavine, a preko 5% pogotovo jako oksidisanom ulju iz eksploatacije (ulje III i IV grupe kvaliteta), mora se obratiti pažnja na izdvajanje taloga zbog poznate činjenice da stara ulja bolje rastvaraju talog. Na licu mjesta u pogonu se u boci napravi mješavina koja će biti hermetički zatvorena i drži se 24h i duže i koja ne smije da dobije zamućenje ili talog. Rezultati ispitivanja mješavine ne smiju da budu lošiji od lošije komponente mješavine (to je obično ulje iz eksploatacije).

6. Regenerisana ulja adsorbentima i inhibirana kao i rerafinisana i inhibirana ulja podliježu istim pravilima miješanja datim za nova ulja.

7. Nije dozvoljeno ni pod kojim uslovima međusobno miješanje mineralnih transformatorskih ulja sa transformatorskim uljima sintetički proizvedenim, kao što su polihlorovani bifenili (PCA), silikonska ulja, organski estri dr.

9. TERMIČKI PRORAČUN

Kao što je u uvodu pomenuto, jedan od mogućih pristupa određivanju preostalog životnog veka je na osnovu istorijata opterećenja i temperature rashladnog fluida. Ovo je metoda koja je sadržana i u standardima za opterećivanje transformatora.

U standardima se konstatuje da relativno starenje dominantno zavisi od temperature najtoplije tačke namota, ali da zavisi i od sadržaja vlage, kiseonika i kiselina u ulju. Izraz po kome se izračunava relativno starenje sadrži samo temperaturnu zavisnost.

Drugi praktični problem u realizaciji algoritma iz standarda je određivanje temperature najtoplije tačke. Faktor najtoplije tačke je vrednost za čije je određivanje potrebno vršiti detaljne proračune, bazirane na detaljnoj konstrukciji transformatora. Ovo je retko moguće, pa je po pravilu neophodno usvojiti približnu (tipsku) vrednost faktora najtoplije tačke, što može dovesti do značajne greške u proračunu vrednosti najtoplije tačke, iz koje se direktno izračunava vrednost relativnog starenja. Opcija izračunavanja temperature najtoplije tačke je njeno merenje korišćenjem fiber-optičkih temperaturnih senzora.

Iz navedenih razloga, postupak iz standarda se može koristiti za dobijanje grube procene starenja transformatora. Sa druge strane, ukoliko bi se model iz standarda koristio kao opciona metoda postupcima baziranim na analizi svojstava ulja i papirne izolacije, odnosno kada bi se rezultati ove dve metode upoređivali, bilo bi neophodno koristiti tačne termičke transformatora, a ne tipične vrednosti toplotnih parametara. Pored toga, za očekivati da će doći do većih razlika ukoliko se u transformatoru u pojedinim dužim vremenskim periodima ima povećan sadržaj vlage.

Zbog napre navedenog, umesto primene metode iz standarda, izvršena je ciljana termička analiza jednog bitnog detalja. Naime, kao što je slučaj i u eksperimentalnim istaživanjima vršenim u okviru ove doktorske disertacije, uzorkovanje papira se vrši izvan namotaja. Da bi se dobila verodostojne vrednosti ostrelosti papira na mestu stvarne najtoplije tačke, koja se nalazi unutar namotaja, potrebno je izvršiti dodatne termičkeanalize, odnosno razviti termičke modele iz kojih je moguće uspostaviti vezu između temperature najtoplije tačke i temperature na mestu uzorkovanja papira. Ovakvi termički modeli su tema ovog poglavlja.

9.1 Opšta jednačina za proračun zagrijavanja provodnih dijelova pri jednodimenzionalnom fluksu

Razmatra se šipka s različitim presjekom S_x , čija se bočna površina hladi u okolini (tečnoj ili gasovitoj), koja ima temperaturu ϑ_0 (Slika 9.1)

Pri relativno maloj razlici temperatura u ravni bilo kojeg presjeka S , toplotni proračun se može svesti na rješavanje zadatka linearnog toplotnog provođenja, pri zadanim graničnim i početnim uslovima i zadanim uslovima unutrašnjeg nastajanja toplote i hlađenja površine.

U ovom slučaju, toplotno stanje nekog dijela dužine d_x (Slika 9.1), čija je zapremina $dV_x = S_x \cdot d_x$ i čiji je obim presjeka Π_x , može da se okarakteriše jednačinom promjene bilansa toplote posmatrane zapremine dV_x :

$$\frac{dQ_{V_x}}{dt} = \frac{dQ_{\lambda_x}}{dt} + \frac{dQ_{\delta_x}}{dt} - \frac{dQ_{\Pi_x}}{dt}. \quad (9-1)$$

U ovoj jednačini

$$\frac{dQ_{\lambda_x}}{dt} = \text{div}(\lambda \text{ grad } \vartheta), \quad dV_x = \lambda \frac{d^2 \lambda}{dx^2} S_x dx \quad (9-2)$$

predstavlja intezitet prirasta toplote u posmatranoj zapremini dV_x , koji nastaje zbog izjednačujućeg linearnog toplotnog fluksa $\Phi(x,t)$, izazvanog osnom razlikom temperature $\frac{d\vartheta}{dt}$;

$$\frac{dQ_{\delta_x}}{dt} = q_{x_t} dV_x = q_{x_t} S_x dx \quad (9-3)$$

je intezitet prirasta toplote zbog unutrašnjih izvora toplote, raspoređenih u posmatranoj zapremini;

$$\frac{dQ_{\Pi_x}}{dt} = k_{x_t} (\vartheta - \vartheta_0) \Pi_x dx \quad (9-4)$$

je intezitet odvođenja toplote iz posmatrane zapremine zbog razmjene toplote s okolinom.

Zamijenivši u (9-1) sabirke, dobijamo:

$$\frac{dQ_{V_x}}{dt} = \left| \lambda \frac{d^2 \vartheta}{dx^2} + q_{x_t} - \frac{k_{x_t} \Pi_x}{S_x} (\vartheta - \vartheta_0) \right| S_x dx \quad (9-5)$$

Prema ranije izvedenoj jednačini, lijevi dio jednačine (9-5) možemo da izrazimo na slijedeći način:

$$\frac{dQ_{V_x}}{dt} = c\gamma \frac{d\vartheta}{dt} S_x dx \quad (9-6)$$

U ovoj jednačini je ukupna promjena bilansa toplote izjednačena s promjenom inteziteta apsorbovanja toplote materijom posmatrane zapremine.

Izjednačujući desne dijelove jednačina (9-5) i (9-6), dobijamo traženu jednačinu toplotnog stanja razmatranog provodnog sistema u tački x.

$$c\gamma \frac{d\vartheta}{dt} = \lambda \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + q(x, t) - \frac{k(x,t)\Pi_x}{S_x} (\vartheta - \vartheta_0) \left| \frac{W}{cm^3} \right| \quad (9-7)$$

Svaki od sabiraka u ovoj jednačini predstavlja intezitet prirasta ili odvođenja toplote u presjeku x, koji se odnosi na jedinicu zapremine. Lijevi dio jednačine karakteriše prelazni proces promjene količine toplote u ovom presjeku, izazvan toplotnom nejednakošću.

U mnogim slučajevima jednačina (9-7) može da izgleda jednostavnije. Naime, za dio voda sa stalnim presjekom po čitavoj dužini i pod istim uslovima odavanja toplote sa površine u okolinu, imamo:

$$S_x = S = const; \quad \Pi_x = \Pi = const; \\ \delta(x, t) = \vartheta(0, t); \quad q(x, t) = q(0, t).$$

Sada ćemo imati:

$$c\gamma \frac{d\vartheta}{dt} = \lambda \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + q(0, t) - \frac{k(0,t)\Pi}{S} (\vartheta - \vartheta_0) \quad (9-8)$$

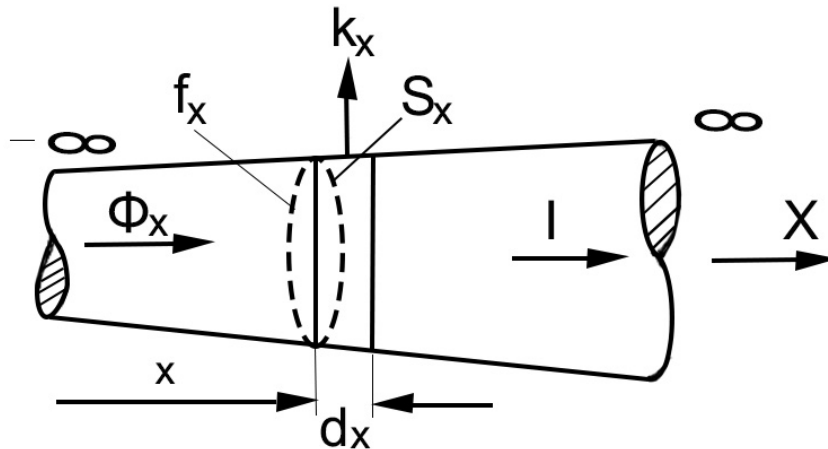
Navedene jednačine ili sistemi jednačine, datog voda su početni za proračun zagrijavanja provodnih dijelova, pri linearnom toplotnom fluksu.

U zavisnosti od postavljanja zadatka i zadanih uslova razmjene toplote, mogu se naći rješenja koja karakterišu odnose između temperature i inteziteta unutrašnjih izvora toplote, ili neposredno, između temperature i veličine struje opterećenja.

Rješavanjem ovih zadataka u opštem obliku, na primjer, u obliku

$$\vartheta(x, t) = f[q(x, t)]$$

Ponekad predstavlja velike teškoće.



Slika 9.1 Prilog izvođenju opšte jednačine zagrijavanja provodnika pri jednodimenzionom fluksu

Većinu praktičnih zadataka toplotnog proračuna predstavljaju specijalni slučajevi, koji se odnose na karakteristične procese zagrijavanja dijelova električnih aparata. Najkarakterističniji su:

- ustaljeni (stacionarni) proces zagrijavanja provodnika pri neposrednom trajnom opterećenju strujom kada ne postoji osna razlika temperature;
- ustaljeni proces zagrijavanja dijela provodnika, kada postoji aksijalni (izjednačavajući) toplotni fluks Φ_x izazvan osnom razlikom temperature;
- ustaljeni proces zagrijavanja provodnog sistema, koji se sastoji od niza dijelova, čija su čela serijski spojena, i koji imaju različite geometrijske parametre i različite uslove odavanja toplote s površine;
- prelazni (nestacionarni) proces zagrijavanja (ili hladjenja) provodnika, kada u njemu ne postoji izjednačavajući osni fluks Φ_x .
- prelazni proces zagrijavanja provodnika, kada postoji izjednačavajući toplotni fluks.

9.2 Ustaljeno zagrijavanje provodnih sistema kada postoji linearni toplotni fluks

U električnim aparatima, u nizu slučajeva, ustaljeni proces zagrijavanja vrši se kada postoji linearni $[\Phi_x = f(x)]$ toplotni fluks, uslovljen nizom faktora kao što su : različiti uslovi unutrašnjeg razvijanja toplote i hlađenja površine na pojedinim dijelovima i postojanje spoljašnjih izvora toplote na graničnim površinama, u pojedinim tačkama x .

Slični električni vodovi u pogledu toplote predstavljaju raznovrsne sisteme, za razliku od ranije razmatranih istovrsnih sistema, koji imaju istu temperaturu na svim tačkama duž ose električnog voda.

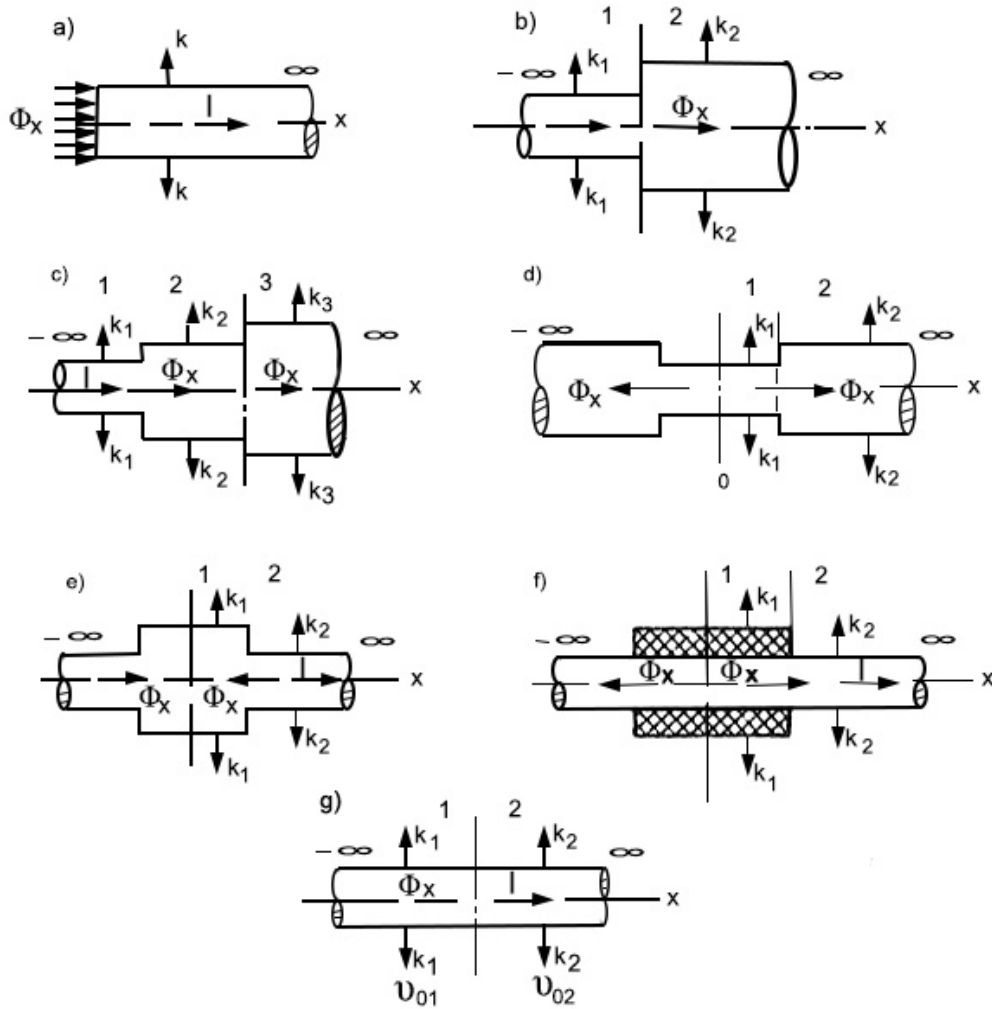
Najkarakterističniji raznovrsni sistemi za električne aparate su šematski predstavljeni na slici 9.2.

1. Poluograničena ili ograničena provodna šipka, stalnog presjeka (slika 9.2,a), koja se istovremeno zagrijava strujom i spoljašnjim izvorom toplote, koncentrisanim na čenoj površini ($x = 0$), koji uslovljava linearni toplotni fluks Φ_x . Provodni sistemi takve vrste odgovaraju uslovima zagrijavanja provodnika, koji ima kontaktne spojeve ili razmake sa stabilnim gasnim pražnjenjem, od čega jedan dio toplote ide u čeone površine.
2. Strujni vodovi stepenastog presjeka (Slika 9.2, b, c, d, e). Zagrijavanje takvih provodnika se karakteriše time, što su u njima osna razlika temperature i postojanje linearnih toplotnih flukseva uslovljeni različitim unutrašnjim razvijanjem toplote (različite gustoće struje i dr.) i hlađenjem površina (različiti k_i i Π_i). Analogan, po karakteru toplotnih procesa, je sistem koji predstavlja provodnik stalnog presjeka, koji ima neki dio pokriven slojem izolacije (Slika 9.2,f).
3. Električni vod stalnog presjeka (Slika 9.2,g), čiji se pojedini dijelovi hlade u sredinama koje imaju različita svojstva odvođenja toplote i različite temperature.

U nekim slučajevima, konstrukciju voda i uslove njegovog hlađenja karakteriše cjelokupnost uslova za pojedine sisteme, koje smo razmatrali. U takve, na primjer (Slika 9.3), mogu spadati: vodovi i stepenasto-promenljivog presjeka, koji se dopunski zagrijavaju spoljašnjim izvorom toplote (Slika 9.3,a) ili koji imaju pojedine dijelove, pokrivene slojem izolacije (Slika 9.3,b) kao i niz drugih.

Zagrijavanje svakog pojedinačnog i-tog dijela bilo kojeg od razmotrenih linearnih raznovrsnih sistema, prema (9-8), može da se okarakteriše jednačinom:

$$\lambda \frac{d^2\vartheta}{dx^2} + q_i(\vartheta) - \frac{k_i(\vartheta)\Pi_i}{S_i} (\vartheta - \vartheta_{0i}) = 0 \quad (9-9)$$



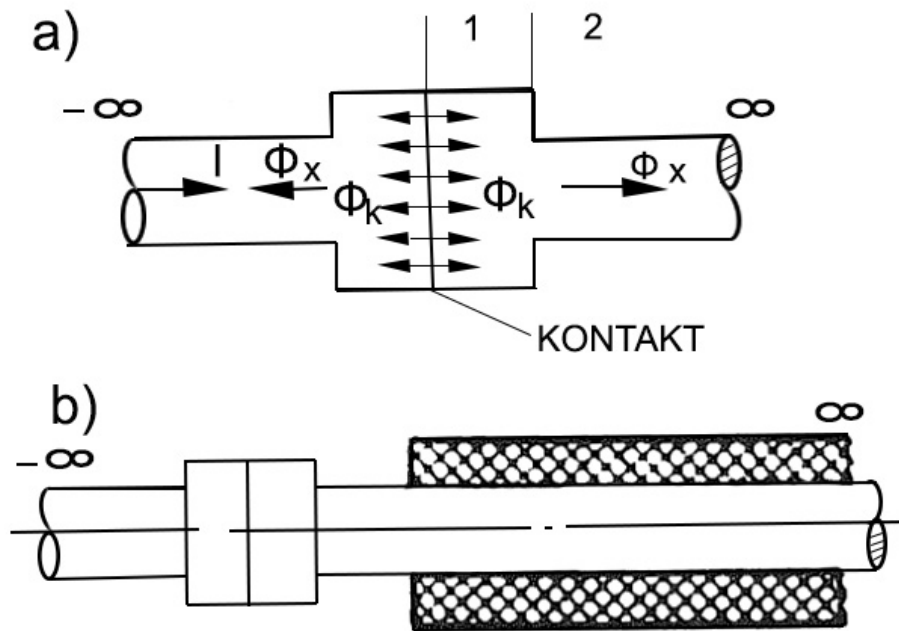
Slika 9.2 Tipične šeme raznovrsnih linearnih provodnih sistema

U ovoj jednačini q_i i k_i zavise od temperature koja se mijenja duž ose provodnika. Zato, strogo uzevši, jednačina (9-9) je nelinearna i njeno rješavanje o opštem obliku može naići na znatne teškoće. Kao što je već rečeno, pri rješavanju sličnih zadataka, primjenjuje se linearizacija datih jednačina, uzimajući pri tome kao konstantne po dužini neke srednje vrijednosti članova, koji ulaze u ovu jednačinu, tj.

$$q_i(\vartheta) = \delta_i^2 \rho_0 (1 + \lambda \vartheta_{i, sr}) = q_i = const$$

$$k_i(\vartheta) = k_{i, sr} = k_i = const$$

gdje je $\vartheta_{i,SR}$ – srednja temperatura, koja se pretpostavlja za dati dio.



Slika 9.3 Složeni raznovrsni linearni provodni sistemi

Prema tome, jednačina (9-9) može da se svede na linearnu jednačinu oblika:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} a_1^2\vartheta + a_2^2 = 0 \quad (9-10)$$

gdje je

$$a_1 = \sqrt{\frac{k_i \Pi_i}{\lambda S_i}}, \quad a_2 = \sqrt{\frac{k_i \Pi_i}{\lambda S_i} \vartheta_0 + \frac{\delta_i^2 \rho_i}{\lambda}}$$

Toplotno stanje čitavog provodnika, koji se sastoji od nekoliko dijelova, može da se predstavi sistemom jednačina oblika (9-10), za svaki od postojećih dijelova:

$$\begin{aligned} \frac{d^2\vartheta}{dx^2} a_1^2\vartheta + a_2^2 &= 0 \\ \frac{d^2\vartheta}{dx^2} b_1^2\vartheta + b_2^2 &= 0 \\ \dots \dots \dots & \\ \frac{d^2\vartheta}{dx^2} n_1^2\vartheta + n_2^2 &= 0 \end{aligned} \quad (9-11)$$

gdje su:

$$a_1 = \sqrt{\frac{k_1 \Pi_1}{\lambda S_1}}, \quad a_2 = \sqrt{\frac{k_1 \Pi_1}{\lambda S_1} \vartheta_0 + \frac{\delta_1^2 \rho_1}{\lambda}}$$

$$b_1 = \sqrt{\frac{k_2 \Pi_2}{\lambda S_2}}, \quad b_2 = \sqrt{\frac{k_2 \Pi_2}{\lambda S_2} \vartheta_0 + \frac{\delta_2^2 \rho_2}{\lambda}} \quad (9-12)$$

.....

Rješenje se traži u obliku $\vartheta(x)$ pri zadanim polaznim podacima (na primjer $I, S_i, \Pi_i, \rho_0, k_i, \vartheta_0$) i zadanim graničnim uslovima.

Kod određivanja graničnih uslova, polazi se od realnih uslova razmjene toplote na krajevima provodnika i na granici dodira susjednih dijelova.

Kod relativno velikog odstojanja krajeva provodnog sistema, mogu se uzeti uslovi kao i za sistem koji ima neograničenu dužinu, tj.

$$x = -\infty; \vartheta_1 = \vartheta_{y1}; \left(\frac{d\vartheta_1}{dx}\right)_{x=-\infty} = 0;$$

..... (9-13)

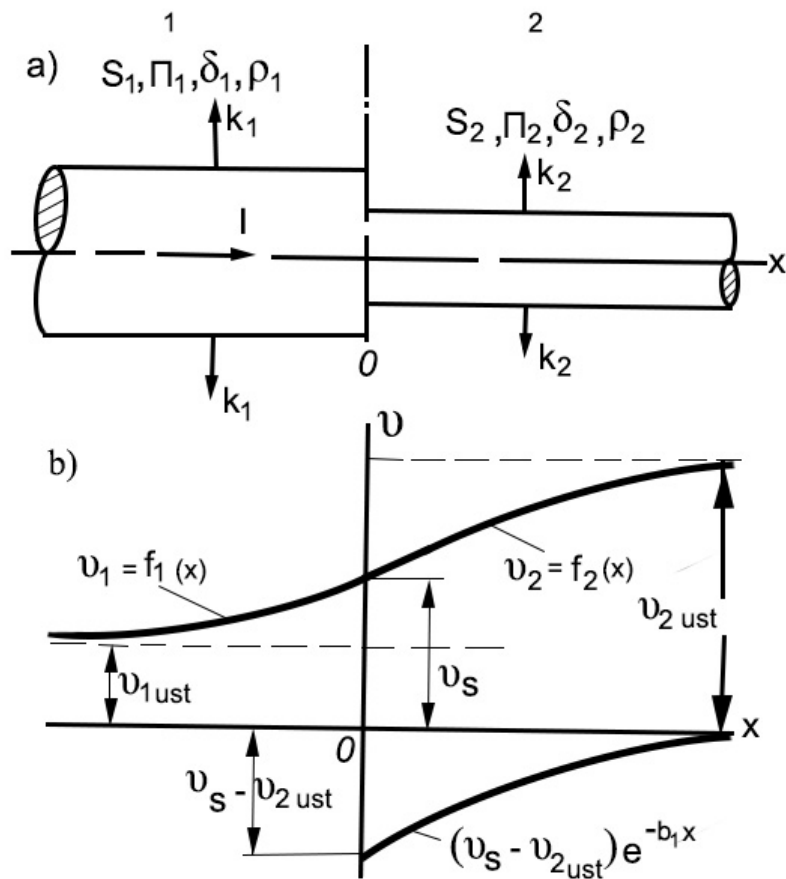
$$x = \infty; \vartheta_n = \vartheta_{y,n}; \left(\frac{d\vartheta_2}{dx}\right)_{x=\infty} = 0;$$

gdje su ϑ_{y1} i ϑ_{y2} – posebna rješenja jednačina (9-11) za krajeve provodnika.

9.3 Proračun ustaljenog zagrijavanja provodnika presjeka koji se stepenasto mijenja po dužini

A. Provodnik sastavljen iz dva dijela.

Provodnik ima dva dijela – 1 i 2, (Slika 9.4,a), od kojih je svaki stalnog presjeka S_1 i S_2 . Krajevi provodnika su beskonačno udaljeni ili toplotno izolovani.



Slika 9.4 Stacionarno zagrijavanje provodnika s presjekom koji se stepenasto mijenja: a) proračunska šema; b) kriva promjene temperature duž provodnika

Prema (9-10), jednačine toplotnog stanja za svaki dio izgledaju:

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} a_1^2 \vartheta_1 + a_2^2 = 0 \quad (9-14)$$

$$\frac{d^2\vartheta}{dx^2} b_1^2 \vartheta_2 + b_2^2 = 0 \quad (9-15)$$

ovde su:

$$a_1 = \sqrt{\frac{k_1 \Pi_1}{\lambda S_1}}, \quad a_2 = \sqrt{\frac{k_1 \Pi_1}{\lambda S_1} \vartheta_0 + \frac{\delta_1^2 \rho_1}{\lambda}}$$

$$b_1 = \sqrt{\frac{k_2 \Pi_2}{\lambda S_2}}, \quad b_2 = \sqrt{\frac{k_2 \Pi_2}{\lambda S_2} \vartheta_0 + \frac{\delta_2^2 \rho_2}{\lambda}}$$

Rješenje ovih jednačina je:

$$\vartheta_1 = A_1 e^{a_1 x} + A_2 e^{-a_1 x} + \vartheta_{1ust} \quad (9-16)$$

i

$$\vartheta_2 = B_1 e^{b_1 x} + B_2 e^{-b_1 x} + \vartheta_{2ust} \quad (9-17)$$

gdje su:

$$\vartheta_{1ust} = \frac{a_2^2}{a_1^2} = \frac{\delta_1^2 \rho_1 S_1}{k_1 \Pi_1} + \vartheta_0$$

$$\vartheta_{2ust} = \frac{b_2^2}{b_1^2} = \frac{\delta_2^2 \rho_2 S_2}{k_2 \Pi_2} + \vartheta_0$$

Svako od rješenja ϑ_{1ust} i ϑ_{2ust} određuje temperaturu zagrijavanja svakog dijela, kada između njih ne postoji razmjena toplote ($\Phi_x = 0$).

Konstante jednačina (9-16) i (9-17) mogu da se nađu iz graničnih uslova:

$$x = \infty; \vartheta_1 = \vartheta_{1ust}; \left(\frac{d\vartheta_1}{dx}\right)_{x=\infty} = 0 \quad (9-18)$$

$$x = 0; \vartheta_1 = \vartheta_2 = \vartheta_s; \left(\frac{d\vartheta_1}{dx}\right)_{x=0} = \left(\frac{d\vartheta_2}{dx}\right)_{x=0} \quad (9-19)$$

$$x = \infty; \vartheta_2 = \vartheta_{2ust}; \left(\frac{d\vartheta_2}{dx}\right)_{x=\infty} = 0 \quad (9-20)$$

Iz uslova (9-18) slijedi da je $A_2 = 0$, pa jednačina (9-16) izgleda:

$$\vartheta_1 = A_1 e^{a_1 x} + \vartheta_{1ust} \quad (9-21)$$

Zbog uslova jednakosti temperatura na granici $x = 0$ imamo:

$$\vartheta_s = A_1 + \vartheta_{1ust}$$

pa je

$$A_1 = \vartheta_s - \vartheta_{1ust}$$

Stavljajući nađenu vrijednost A_1 u jednačinu (9-21), dobijamo jednačinu koja karakteriše promjenu temperature duž prvog dijela provodnika:

$$\vartheta_1 = (\vartheta_s - \vartheta_{1ust}) e^{a_1 x} + \vartheta_{1ust} \quad (9-22)$$

Na isti način, na osnovu uslova (10-77), nalazimo da je $B_1 = 0$. Prema (9-17) je:

$$\vartheta_s = B_2 e^{-b_1 x} + \vartheta_{2ust} \quad (9-23)$$

Kao i u prethodnom slučaju, za $x = 0$ imamo da je:

$$\vartheta_s = B_2 + \vartheta_{2ust}$$

odakle je

$$B_2 = \vartheta_s - \vartheta_{2ust}$$

Na taj način jednačina (9-17) izgleda:

$$\vartheta_2 = (\vartheta_s - \vartheta_{2ust}) e^{-b_1 x} + \vartheta_{2ust} \quad (9-24)$$

Vrijednost temperature ϑ_s na granici dodira dva dijela nalazimo na osnovu jednakosti izvoda (9-19) pri $x = 0$:

$$a_1(\vartheta_s - \vartheta_{1ust}) = b_1(\vartheta_s - \vartheta_{2ust})$$

odavde slijedi da je

$$\vartheta_s = \frac{a_1 \vartheta_{1ust} + b_1 \vartheta_{2ust}}{a_1 + b_1} \quad (9-25)$$

Kriva $\vartheta = f(x)$ je prikazana na slici 9.4, b.

B. Provodnik koji na sredini ima dio smanjenog ili povećanog presjeka

Provodnik neograničene dužine presjeka S_2 (Slika 9.5, a), ima na sredini dio dužine $2x_0$ sa smanjenim presjekom $S_1 < S_2$.

Analogno prethodnom slučaju, za svaki od dijelova 1 i 2 jedne polovine razmatranog sistema mogu, za toplotno stanje, da važe jednačine oblika (9-11), čija konačna rješenja mogu da se predstave na slijedeći način:

$$\vartheta_1 = A_1 e^{a_1 x} + A_2 e^{-a_1 x} + \vartheta_{1ust} \quad (9-26)$$

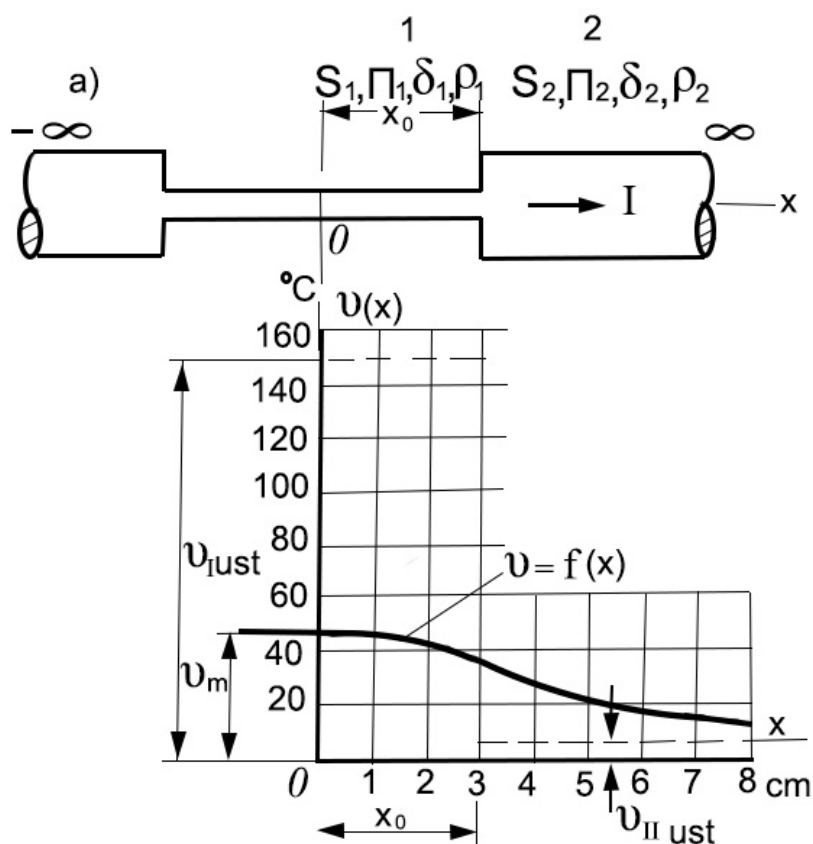
$$\vartheta_2 = B_1 e^{b_1 x} + B_2 e^{-b_1 x} + \vartheta_{2ust} \quad (9-27)$$

Kao relativno male promjene presjeka, konstantne se mogu naći iz graničnih uslova:

$$x = 0; \vartheta_1 = \vartheta_m; \left(\frac{d\vartheta_1}{dx}\right)_{x=0} = 0 \quad (9-28)$$

$$x = x_0; \vartheta_1 = \vartheta_2; \left(\frac{d\vartheta_1}{dx}\right)_{x=x_0} = \left(\frac{d\vartheta_2}{dx}\right)_{x=x_0} \quad (9-29)$$

$$x = \infty; \vartheta_2 = \vartheta_{2ust}; \left(\frac{d\vartheta_2}{dx}\right)_{x=\infty} = 0 \quad (9-30)$$



Slika 9.5 Zagrijavanje provodnika, koji ima dio smanjenog presjeka: a) proračunska šema; b) proračunska kriva promjene temperature duž provodnika

Prema jednačini (9-28), nalazimo:

$$\left(\frac{d\vartheta_1}{dx}\right)_{x=0} = a_1 A_1 \quad a_1 A_2 = 0$$

Odavde je

$$A_1 = A_2 = A$$

Prema tome, jednačinu (9-26) možemo napisati ovako:

$$\vartheta_1 = A(e^{a_1x} + e^{-a_1x}) + \vartheta_{1ust} = 2A c a_1x + \vartheta_{1ust}$$

Pri

$$x = 0; \vartheta_1 = \vartheta_m;$$

je

$$A = \frac{1}{2}(\vartheta_m - \vartheta_{1ust})$$

Na taj način nalazimo, da se u prvom dijelu promjena temperature karakteriše jednačinom:

$$\vartheta_1 = (\vartheta_m - \vartheta_{1ust}) c a_1x + \vartheta_{1ust} \quad (9-31)$$

Iz jednačine (9-27) i (9-30) dobivamo da je $B_1 = 0$. Otuda se jednačina za drugi dio svodi na oblik:

$$\vartheta_2 = B_2 e^{-b_1x} + \vartheta_{2ust} \quad (9-32)$$

Iz uslova jednakosti izvoda (9-29) je

$$B_2 = \frac{a_1}{b_1}(\vartheta_{1ust} - \vartheta_m) e^{b_1x_0} a_1x_0$$

odakle nalazimo jednačinu raspodjele temperature u drugoj dijelu:

$$\vartheta_2 = \frac{a_1}{b_1}(\vartheta_{1ust} - \vartheta_m) e^{-b_1(x-x_0)} a_1x_0 + \vartheta_{2ust} \quad (9-33)$$

Maksimalna temperatura ϑ_m u tački $x = 0$ može da se nađe iz uslova jednakosti temperatura na ovoj granici,

$$\vartheta_m = \vartheta_{1ust} - \frac{\vartheta_{1ust} - \vartheta_{2ust}}{ch a_1x_0 + \frac{a_1}{b_1}sh a_1x_0} \quad (9-34)$$

10. REZULTATI EKSPERIMENTA

Dobra procena preostalog radnog veka transformatora jako zavisi od njegove definicije. Iako Radna grupa CIGRE 12.09 [10] prepoznaje: tehnički, strateški i ekonomski kraj radnog veka, transformatori se retko zamenjuju zbog razloga koji nisu tehnički, – čak i u visoko razvijenim zemljama – ali uglavnom u slučaju kada su izolacione osobine njegovog uljno – papirnog sistema značajno oslabile. Proces starenja se razvija u tri istovremena režima, uzrokovanih temperaturom i prisustvom sledećih agenasa: pirolize, hidrolize, oksidacije [11]. Piroliza prevlađuje na temperaturama iznad 110 – 120°C, zbog njene potrebe za energijom aktivacije, koja je 1,2 do 1,4 puta veća od one za hidrolizu, koja prevlađuje na nižim temperaturama. Reakcija sa vodom se dešava uglavnom dejstvom kiselina, koje se dobijaju preko oksidacije ulja, koja sadrži potreban atom vodonika. Unutar ovog složenog sistema interakcije, dešava se razdvajanje lanca vlakana celuloze molekula glukoze, koje ima za posledicu izdvajanje CO, CO₂, vode, i stvaranje polarizovanih grupa nestabilnog anhidrida laevoglukoze-glukoze. Furanske kiseline su slabo rastvorive u mineralnim uljima, što obično ima za posledicu njihovo sakupljanje na spoljašnjoj površini papira. Glavni deo derivata furana se koncentriše na papiru, ali deo njih prodire u ulje, što je posebno slučaj sa furfur-aldehidima – 2 FAL [12,13]. Hidroksilne grupe, prisutne u celulozi, oksidišu, stvarajući vodu, CO i CO₂ [14]. Prisustvo rastvorenog kiseonika visoki sadržaj vode takođe prilično jače utiče na stvaranje okside ugljenika i derivate furana [12,15].

Za transformatore u radu je od najvećeg značaja da se zna stanje njegovog sistema izolacije, što je neposredno povezano sa njegovim preostalim radnim vekom. Za nadzor stanja transformatora, razvijene su sledeće metode: gasna – DGA i tečna - HPLC hromatografija ulja; što se tiče čvrste izolacije, merenje indeksa polimerizacije DP je najvažnije ispitivanje, ali su od nedavno neke nove metode još u razvoju, kao: merenje struja polarizacije i depolarizacije PDC, foto - elektronska spektroskopija u domenu X - zračenja XPS ili sub - infracrvenom domenu NIR, FTIR, merenje suprotnog napona RVM [16-19].

DP metoda, zasnovana na nalaženju prosečnog broja molekula glukoze u lancu celuloze, je najpouzdanija. DP vrednost nove izolacije je u opsegu 1000 do 1400, a ona od degradirane oko 200 [20-22]. Prilično dobro rešenje ovog problema je delimično odlivanje ulja i uzimanje uzoraka sa priključaka niženaponskog namotaja (NN) kada se preduzimaju regularni periodični pregled i održavanje [23]. DP merenje uzoraka se vrši najčešće korišćenjem standardnog viskozometrijskog metoda (IEC 60450), merenjem prosečne polimolekularne mase (težine). Nedavno se pojavio novi metod, odnosno hromatografija permeabilnosti želatina (GPC), dodavajući raspodelu molekulskoj težini (masi). Na ovaj način, razlika degradacije celuloznih i policeluloznih vlakana se može naći [24].

Prethodna merenja načinjena na blok (generatorskim) transformatorima (GT) elektrane [25-28] su imala namenu da uspostave mogućnost da se nazivna snaga poveća za 10 % sa termičkog gledišta. Ovde će se predstaviti rezultati DP merenja uzetih sa jednog GT, da bi se sačinila osnova za procenu preostalog radnog veka, kao i za korelaciju sa merenjima na uzorcima ulja tečnom hromatografijom.

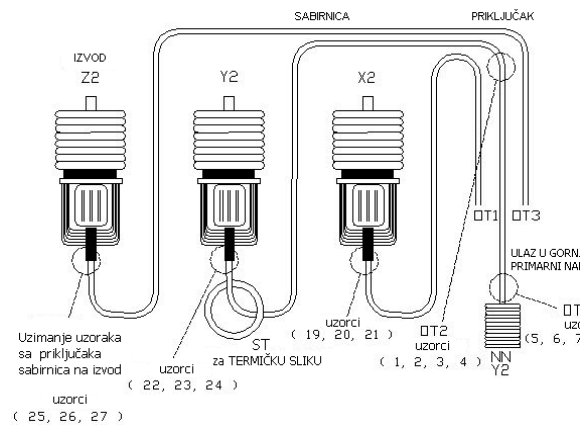
10.1 Uzimanje uzoraka sa GT papirne izolacije

Potrebno je uzeti prilično brojne primerke uzoraka izolacije sa različitih mesta. Razlog je činjenica da porast temperature, stepen izlaganja električnim, hemijskim i mehaničkim uticajima, uključujući i tok ulja, se razlikuju dosta od mesta do mesta. Sa transformatorom *na licu mesta*, uzimanje uzoraka je najbolje da se uradi zajedno da drugim radovima na održavanju kada se zvonasti poklopac rezervoara skine i ulje delimično odlije. Nažalost, ovo se dešava vrlo retko u praksi i podložno je vremenskim uslovima, pošto izolacija može da se ovlaži. Pre otvaranja se savetuje da se transformator načini toplijim u odnosu na okolni vazduh, da bi se izbegla kondenzacija vlage. U takvim slučajevima ulje se delimično odliva, izvodi i njihovi poklopci se skidaju, i uzorci se uzimaju sa gornjih delova namotaja, odnosno sa pristupačne sabirničke veze na ulazu u namotaj, gde je namotaj najtopliji. Mora se imati na umu da rezultati DP merenja na ovim mestima mogu da budu lošiji, odnosno opasniji za izolaciju, od očekivanih, zato što je moguće da sabirnička veza može da bude podložna pregrevanju bilo zbog enormnog rasipnog fluksa, ili slabog protoka ulja, ili labavih sabirničkih veza. Kako je ovo uzimanje uzoraka invazivni postupak, kasnije novo saniranje izolacije je neizbežno.

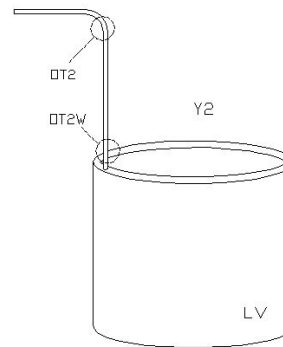
Papirni uzorci izolacije su uzeti sa unutrašnjih sabirničkih veza svih primarnih NN namotaja, neposredno na glavi ulaznog izvoda (X1, Y1, Z1, X2, Y2, Z2), zato što su oni termički kritična mesta, budući smeštena na vrhu, gde je protok ulja slab, i verovatno imajući slabe veze. Tri uzorka su uzeta sa svakog od ovih mesta, odnosno sa spoljašnjeg papirnog sloja (O), međusloja (M) i unutrašnjeg sloja, smeštenog neposredno blizu sabirnice (I), što čini ukupno 18 uzoraka (Slike 10.1 i 10.2). Da bi se dobilo stanje što je moguće bliže primarnom namotaju, bira se sabirnička veza srednje faze drugog primarnog NN namotaja Y2, zato što je smeštena potpuno u gornjoj polovini transformatora. Uzimaju se četiri uzorka (slojevi O, M, I i II) sa Y2 sabirničke veze, označene sa OT2 (izlazna sabirnica 2), koja je smeštena u gornjem delu transformatora, i za koju je vizuelno utvrđeno da je najviše izložena, imajući najtamniju boju i najoštećeniji papir. Takođe, pet uzoraka (slojevi OO, O, M, I, II) na mestu OT2W (veza namotaja sa sabirnicom 2) u neposrednom dodiru sabirnice sa Y2 priključkom namotaja se uzima. Mesta uzimanja uzorka i položaji slojeva su prikazani na Slikama 10.1, 10.2, 10.3 i 10.4.

Pre početka uzimanja uzoraka, deo od 12 tona ulja je uklonjen, jedan deo u konzervator, a drugi deo u dva rezervoara, unapred pripremljenih i prečišćenih propisanim postupkom. Ukupno, 27 uzoraka izolacionog papira su uzeti zajedno sa

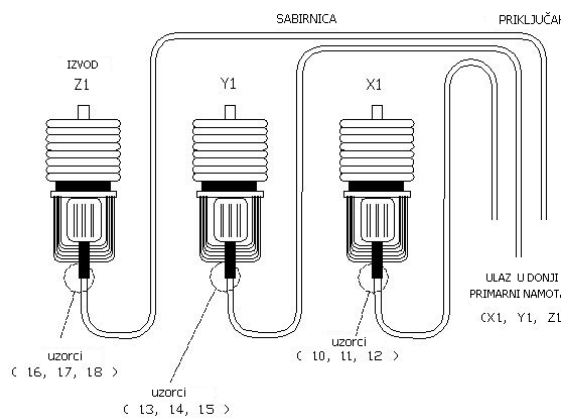
svojim izolacionim uljem. Nakon uzimanja uzoraka, izveden je poseban postupak sanacije, odnosno, novog izolovanja svih tačaka sa kojih su uzeti uzorci, korišćenjem papira nove generacije (što se ovde neće opisivati). Da bi se dobila osnova za poređenje, merio se DPv uzorka novog papira, tako da je ukupan broj obrađenih uzoraka bio 28.



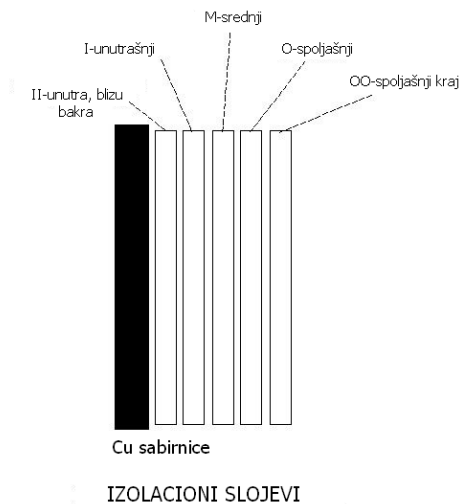
Slika 10.1 Mesta uzimanja uzoraka za merenje DP indeksa gornjeg dela namotaja



Slika 10.3 Mesto uzimanja uzoraka na sabirničkoj vezi faze Y2: na gornjem delu (O12) i neposredno na ulazu u namotaj (O12N)



Slika 10.2 Mesta uzimanja papirnih uzoraka za merenja DP indeksa nižeg dela namotaja



Slika 10.4 Mesto uzimanja uzorka u skladu sa položajima slojeva

10.2 Metod merenja i rezultati merenja

Indeksi viskoznosti – stepen polimerizacije DP – su uspostavljeni standardnom viskozimetrijskom metodom u sveže pripremljenom rastvaraču – bakar - etilen diamin (CED ili Cuen). Da bi se odredila (granična) viskoznost ν , potrebna da se izračunaju vrednosti indeksa polimerizacije DP, koristio se Ubelodov kapilarni viskozimetar; merenja su se izvodila na temperaturi 25° C u vodenom kupatilu.

Da bi se dobila karakteristika viskozimetrijskom metodom, bilo je potrebno da se oslobode uzorci iz ulja. Ovo je učinjeno vađenjem uzorka pomoću toluola i hloroforma. Nakon toga, uzorci su oprani etanolom, i osušeni u vakumskom aparatu za sušenje (na niskim temperaturama) do konstantne mase. Iako su sušenja na višim temperaturama propisana postupkom, nije bilo odgovarajuće, pošto bi ispitivani papir mogao da se ošteti više puta, što bi vodilo do merne nesigurnosti [29,30], posebno pošto je papirna izolacija bila relativno stara. Uzorci koji su prošli opisani postupak, su rastvoreni u pripremljenom rastvaraču – CED. Najpre, specifična viskoznost ν_{sp} (u skladu sa viskoznošću materijala koji se rastvara i rastvaračem) za broj različitih koncentracija polimera (celuloza) je merena, da bi se dobile vrednosti specifičnih graničnih brojeva viskoznosti ν linearnom ekstrapolacijom.

Postoji mnogo funkcija korelacija za izračunavanje vrednosti DP preko ν , kao, na primer, IEC, ASTM, SCAN-C15:62, R. Evans [31], M. Marks [32] itd., koje su predstavljene u Tabeli 10.1. U ovom radu, proračun koji se primenjivao je bio sa Marksovom korelacijom, pošto pokriva sve DP - ove u literaturi – u rasponu od nove do potpuno degradirane izolacije.

Rezultati merenja su prikazani u Tabeli 10.2. Da bi se dobile referentne vrednosti, DP se merio i za novi papir (novu generaciju), koji se koristio za saniranje, odnosno da pokrije tačke odakle su uzeti uzorci.

Ovo merenje se nije moglo neposredno izvesti, iako je papir bio bez ulja, zato što nije bilo moguće rastvoriti novi papir u pripremljenom rastvaraču. Bilo je moguće postići puno rastvaranje samo nakon vađenja toluolom i hloroformom, pranjem etanolom i sušenjem. Ovo naravno znači da je novi papir vrlo verovatno impregnisan supstancom koja nije rastvorljiva u CED, sa ciljem da se uspori starenje papira pod radnim uslovima. Stoga, može da se pretpostavi da papir, uzet kao uzorak, je imao indeks polimerizacije tokom proizvodnje transformatora nešto niži od sadašnjeg papira nove generacije (meren 1235) [33].

Tabela 10.1 Funkcije koje povezuju DP i ν

AST M	SCAN – C15:62	R. Evans [22]	M. Marks [23]	IEC 60450
DP=1 ,9 ν	DP ^{0,905} = 0,75 ν	DP ^{0,9} = 1,65 ν	DP ^{0,9} = 1,22 ν	[ν]=K DP ^{α}

**Tabela 10.2.a. Granična viskoznost i DP indeks za uzorke uzete sa GT -
Priključak sabirnice Y2 gornjeg dela (OT2) i neposredno na ulazu u namotaj
(OT2W)**

Uzorak	Mesto / sloj	DP _{ν}
1	OT2 Unutrašnji (blisko Cu) II	164
2	OT2 Unutrašnji I	302
3	OT2 Srednji M	360
4	OT2 Spoljni O	494
5	OT2W Unutrašnji (blisko Cu) I I	206
6	OT2W Unutrašnji I	319
7	OT2W Srednji M	402
8	OT2W Spoljni O	444
9	OT2W Sasvim spoljni OO	519

**Tabela 10.2.b. Granična viskoznost i DP indeks za uzorke uzete sa GT - Veze
sabitnica na izvodima sa dva primarna NN namotaja prve grane (X)**

Uzorak	Mesto / sloj	DP _{ν}
10	X1 Unutrašnji I	294
11	X1 Srednji M	357

12	X1 Spoljnji O	418
19	X2 Unutrašnji I	243
20	X2 Srednji M	542
21	X2 Spoljnji O	449

Tabela 10.2.c. Veze sabirnica na izvode sa dva primarna NN namotaja druge grane (Y)

Uzorak	Mesto / sloj	DP _v
13	Y1 Unutrašnji I	375
14	Y1 Srednji M	441
15	Y1 Spoljnji O	387
22	Y2 Unutrašnji I	348
23	Y2 Srednji M	422
24	Y2 Spoljnji O	481

Tabela 10.2.d. Veze sabirnica na izvode sa dva primarna NN namotaja treće grane (Z)

Uzorak	Mesto / sloj	DP _v
16	Z1 Unutrašnji I	224
17	Z1 Srednji M	471
18	Z1 Spoljnji O	439
25	Z2 Unutrašnji I	208
26	Z2 Srednji M	276
27	Z2 Spoljnji O	290

Tabela 10.2.e. Nova izolacija stavljena na sva mesta

28	Papir nove generacije (NI)	1235 (1100)
----	----------------------------	-------------

Stoga je prirodno da se smatra da je generatorski (blok) transformator imao približno uniformnu DP vrednost papirne izolacije oko 1000 – 1100. Neki uzorci uzeti sa određenih perifernih sabirnica su nađeni da imaju potpuno ugljenisan papir (DP = 124), što je u skladu sa [21], gde se tvrdi da potpuno mehanički degradiran papir ima vrednost DP 100 – 150. U skladu sa podacima iz nekih praktičnih posmatranja [14,16,21,24] vrednosti donje granice su u opsegu 100 do 200; stoga bi moglo da se pretpostavlja da je konačna radna vrednost 200, imajući na umu stepen značaja transformatora.

10.3 Analiza izmerenih rezultata

Za novi rad, u vreme kada se proizvodio transformator i počeo sa svojim radom, može da se pretpostavi da (u skladu sa nekim merenjem i podacima iz literature), indeks viskoznosti polimerizacije je imao vrednost između $DP_0 = 1100$ do 1200, ali – u skladu sa prethodnom diskusijom – uzeće se vrednost 1100. Kada indeks dostigne vrednosti niže od 250, događa se mehanička degradacija; kada je papir zaprašen, indeks opada ka 150. Imajući na umu da su izolacione osobine još prisutne i kada je značajno mehanički degradiran, može se uzeti da je granica kada se gube i izolacione i mehaničke osobine – takođe u skladu sa objavljenom literaturom – na vrednosti $DP_1 = 200$ ili nešto niže, ali ne manje od 150.

NN sabirničke veze, od primarnih izvoda do samih ulaza u namotaj, imaju prilično niske vrednosti DP, što znači da je izolacija značajno degradirana, posebno slojevi papira blizu bakra. Glavni uzrok je starost izolacije (više od 33 godine rada za GT), ali drugi uzroci su takođe mogući, posebno za sabirničke veze sa kojih su uzeti uzorci.

Tokom uzimanja uzoraka, nađeni su brojni oslabljeni kontakti na sabirničkim vezama i izvodima, kao i blogo spaljena izolacija u njihovoj blizini. Ovo znači da je uzrok ubrzanog starenja na ovim mestima preterano zagrevanje uzrokovano oslabljenim kontaktima.

Uzorci su uzeti na gornjoj sabirničkoj vezi (na vrhu GT), gde je ulje najtoplije i strujanje ulja je takođe slabo, što za posledicu ima da je termičko starenje u ovom delu prostora ubrzano.

Mesta uzoraka su odabrana na tačkama gde najveća šteta može da se posmatra vidljivo.

Prisustvo kiseonika iz vazduha (ne postoji membrana) je uzrokovalo enormnu pojavu jona između bakra i unutrašnjih slojeva papira, što je imalo za posledicu ubrzavanje procesa degradacije papira. Ovo je potvrđeno činjenicom da uopšteno gornji slojevi (bliski bakru) su gore degradirali od spoljašnjih (niži DP).

Zapaža se u tome, da u nekoliko slučajeva, međuslojevi izolacionog papira su u boljem stanju nego spoljašnji i unutrašnji (za transformator o kome se radi ovo se održava za izolaciju kontakata sabirnica ka izvodima Y1, Z1, X2), što je posledica preovlađivanja mehaničkih i elektrohemijskih naprezanja spoljašnje strane izolacije u odnosu na termičke, prenete sa unutrašnjih slojeva.

Izolacija sabirničkih veza povećava njihovu debljinu, odnosno broj slojeva papira raste kada se ide sa početka namotaja Y2, odakle su uzeti uzorci. Ovo znači da je prvi sloj papira, najbliži bakru, u najgorem položaju u odnosu na ulje, i, stoga izložen jakim termičkim naprezanjima. Ovo je razlog što su ovi slojevi u potpuno degradiranom stanju (slojevi II sa DP = 164 i 206). Ali, zbog činjenice da je broj papirnih slojeva na ovim mestima veći od 5, gubitak izolacionih svojstava prvog sloja bliskih bakru se može tolerisati, posebno kada sledeći slojevi imaju stepenasti i značajan porast indeksa DP. Ovo je slučaj obrađene sabirničke veze, ali, zbog činjenice da ovaj porast nije posebno velik (poslednji sloj ima DP = 519), savetuje se da se verifikuje izolaciona osobina nakon razumnog vremenskog perioda, što podrazumeva novo uzimanje uzorka i merenje indeksa polimerizacije, da bi se zapazio ubrzani porast degradacije izolacije u vremenu.

10.4 Procena preostalog radnog veka generatorskog (blok) transformatora zasnovano na njegovom stvarnom stanju

Sledeći proračun će se izvesti bez dve najniže vrednosti DP indeksa iz Tabele 10.2, zato što se pregrevanje izaziva velikim brojem slojeva i oslabljenim hlađenjem. Sve druge merene vrednosti DP indeksa su u rasponu između granica 224 do 552. Zavisnost radnog veka od temperature (odnosno opterećenja) ima eksponencijalni karakter [33] i obrađuje se u standardima [34,35]. Za svaku temperaturu – ili opterećenje – indeks DP se smanjuje sa temperaturom približno na linearan način, do vrednosti 200. Rezultati ispitivanja [14,22,36] su potvrdili ovo tvrđenje; tu se uzima da je linearnost takođe važeća za ciklična opterećenja [14] koja mogu da se uzmu kao stvarna za transformatore u elektranama [25]. Stoga, izgleda opravdano da se pretpostavi da indeks DP se smanjuje linearnom tokom njegovog radnog veka, tako da sledeća relacija može da se uvede: linearni godišnji faktor degradacije izolacije YFD_x je:

$$YFD_x = \frac{DP_0 - DP_{av,x}}{Y}, \quad YFD_x \% = \frac{YFD_x \times 100}{DP_0} \quad (10-1)$$

gde je DP_0 indeks depolimerizacije papira na početku rada transformatora, $DP_{av,x}$ je prosečna vrednost izmerenog DP papirnog sloja označenog sa »x« i Y je broj godina rada transformatora.

Procenjeni broj godina preostalog radnog veka ($L_{r,x}$) na mestu x je:

$$L_{r,x} = \frac{DP_{av,x} - DP_1}{YFD_x}, \quad (10-2)$$

gde je DP_1 indeks depolimerizacije potpuno degradiranog papira.

Izolacija u navojcima gornjeg sloja drugog primarnog namotaja (X2, Y2, Z2), smeštena u gornjoj polovini transformatora, je najizložena, zato što je tu ambijent na najvišoj temperaturi.

Prosečni faktor godišnje degradacije izolacije transformatorskog namotaja YFD je 20,15 godišnje, odnosno godišnje opadanje DP je 1,83%. Preostali radni vek izolacije namotaja koja se ispituje se posledično procenjuje da je približno 13 godina, što znači da će transformator, pod uslovom da se opterećuje na isti način i u obimu kao do sada, imati ceo radni vek od 45 godina, što znači da je »proveo« 71 % svog života do sada. Međutim, treba da se uzme u obzir da ova procena ne može da uključi lokalne oštećene tačke, ili neregularne pojave [37-39], kao dugotrajna opterećenja koja mogu da izazovu ozbiljan kvar u izolaciji transformatora sa verovatnim vidnim odvajanjima sa priključaka.

Privremeni pristup za procenu starenja zasnovan na IEC 60076-7 i predlogu CIGRE koristi poboljšani „Arhenijusov model“ za degradaciju papira:

$$1/DP_1 - 1/DP_{av,x} = k \cdot L = A e^{(-E_a/RT)} \cdot L, \quad (10-3)$$

gde je E_a energija aktivacije, A je konstanta koja zavisi od radnih uslova, prisustva vlage i kiseonika itd, R je gasna konstanta – 8,314 J/(molK) i L je preostali radni vek.

$$\text{Oдавde: } L = \frac{1/DP_1 - 1/DP_{av,x}}{k \cdot 24 \cdot 365} \text{ godina} \quad (10-4)$$

Za generatorski (blok) transformator koji se razmatra, sa $DP_{av} = 455$, radna temperatura od 80°C (353 K) i 1–1.5 % vlage, je konstanta $k = 2.45 \cdot 10^{-8}$ [40]. Oдавde je preostali radni vek:

$$L = \frac{1/200 - 1/455}{2.45 \cdot 10^{-8} \cdot 24 \cdot 365} = 13 \text{ godina} \quad (10-5)$$

Ovaj rezultat odgovara sa gornjim pojednostavljenim metodom izračunavanja zasnovanom na linearnom godišnjem faktoru degradacije YDFx.

Konačno, prethodno načinjena izračunavanja od autora of utroška radnog veka zasnovanog na dijagramima opterećenja su pokazala da je GT proveo 19 relativnih godina. Pradhan [14] daje empirijsku formulu za »trajanje potrošenog radnog veka «

ET transformatora zasnovano na početnim i izmerenim vrednostima indeksa DP u određenom trenutku:

$$ET = 20,5 \ln \frac{DP_0}{DP_{av}} = 20,5 \ln \frac{1100}{455} = 18,1 \text{ godina} \quad (10-6)$$

što je u dobroj korelaciji sa izračunavanjem zasnovanim na neposrednim izračunavanjima stanja korišćenjem DP indeksa. Mora se imati na umu da se stanje izolacije u gornjim navojcima može očekivati da je malo bolje od onog na ulazu, bliskom sabirničkim vezama.

10.5 Određivanje sadržaja furana i čestica u ulju za GT

Najbolji metod za određivanje stanja i preostalog radnog veka izolacije je merenje indeksa DP. Stoga, osim DGA analize, metoda tačne hromatografije se najčešće koristi u praksi (HPLC – IEC 61198) koja čini mogućim određivanje derivata furana; dobro je poznato da ovaj proizvod degradacije papira ima korelaciju sa indeksom DP. Nedavno, u ovdašnjoj praksi, brojna merenja broja i dimenzija čestica su takođe zapažena (ISO 4406 (1999)E, NAS 1638, SAE Codes) kao i druge metode.

Derivati furana u ulju su proizvod degradacije celulozne izolacije, tako da je njihova pojava neposredno u međusobnoj vezi sa stepenom degradacije, odnosno DP. Postoji uopšte jaka težnja da se uspostavi čvrsta korelacija između koncentracije derivata furana (najčešće 2-furfural ili 2-FAL) i DP, da bi se načinili uslovi da se proceni stanje i preostali životni vek transformatora, zasnovan na HPLC ili drugoj laboratorijskoj analizi ulja. Ova međusobna zavisnost može da se odredi bilo eksperimentalnim krivama za različite tipove papira [41], ili statističkim rasporedom rezultata, koji se dobijaju na velikom broju transformatora, stvaranjem osnove za sačinjavanje serije formula interpolacije [16, 42-47], itd. Postoje neke razlike u izražavanju koncentracije – bilo (mg/l) ili (mg/kg). Iako su uspostavljene mnoge empirijske formule, čvrsta korelacija ne postoji do sada [48]; stoga, nema pouzdane procene preostalog radnog veka na osnovu koncentracije 2FAL, ali je čak sasvim sigurno da značajna koncentracija derivata furana znači da je nastala ozbiljna degradacija papirne izolacije. U Tabeli 10.3 su predstavljene izmerene vrednosti 2FAL u ulju GT, a u Tabeli 10.5 izračunate vrednosti indeksa DP posredstvom datih funkcija korelacije.

Tabela 10.3 Merenje sadržaja 2-furfurala u uljima GT

Merni podatak	Prvo	Nakon 2 godine	Nakon 2,5 godine
Koncentracija 2-furfurala	0,57 [mg/kg]	0,40 [mg/l]	0,44 [mg/l]
Prosečne vrednosti	0,505 [mg/kg] ili 0,449 [mg/l]		

Ima nekoliko razloga zašto je nemoguće da se uspostavi prilično važeća (precizna) funkcija korelacije za DP – 2FAL. Ovo lako može da se razume gledanjem rezultata iz Tabele 10.4. Opšti faktori su sledeći: tip i dizajn transformatora, vrsta papira - celuloze (poreklo) i uticaj proizvođača, dodir sa okolnom atmosferom, stanje ulja, radni uslovi, povišena temperatura koja smanjuje njegovu koncentraciju, intervenisanje u sistemu izolacije i opšti uslovi stvaranja 2FAL i njegova rastvorivost. Postoje takođe posebni razlozi: neujednačeno razdvajanje 2FAL tokom normalnog starenja i abnormalni (neuobičajeni) uslovi, lokalni kvarovi itd. Stoga je najbolje da se mere indeksi DP, ali takođe da se načine druga odgovarajuća merenja.

Tabela 10.4 Izračunato DP posredstvom funkcija korelacije sa 2FAL

Čendong [36]	Pahlavanpur [4]	De Pablo [37]	De Pablo [3]
$(1,51 - \ln 2FAL) / 0,0035$ =530	$800 / (0,186 \cdot 2FAL + 1)$ =731	$1850 / (2FAL + 2,3)$ =659	$7100 / (8,88 + 2FAL)$ =756

Rezultati granulometrijske analize čestica (x/100 ml) u ulju GT merenog uzorka su prikazani u Tabeli 10.5, zajedno sa rezultatima ispitivanja novog ulja koje je spremno da se sipa unutra.

Iako izmerene vrednosti zadovoljavaju zahteve regulacije, može se zapaziti da čestice postoje čak i u novom pripremljenom ulju. U skladu sa preporukom dobro poznatih proizvođača ulja, nađen broj čestica premašuje granice, tako da se preporučuje filtriranje [49]. Stoga, može da se zaključi da je postupak koji se koristio do sada za pripremu ulja za sipanje unutra, ili nije zadovoljavajući, ili postoji kontaminacija u sudu gde se ulje čuva. U svakom slučaju, ceo postupak treba da se revidira, uključujući promenu metode i/ili uzimanje nove aparature.

Tabela 10.5 Rezultati granulometrijske analize čestica u ulju GT i novog ulja

Dimenzije čestica (μm)	BT	Novo ulje ENOL-C
1-5	435897	1411765
5-10	35897	62562
10-20	5128	0
20-50	184	213
50-100	78	58
>100	20	21
Vlakna	12	11
Klasa u skladu sa NAS 1638	8	8

ZAKLJUČAK

Transformatorska ulja pored svoje osnovne uloge da istovremeno služe i kao dielektrik, tj. izolator i kao rashladna tečnost, imaju i vrlo važnu posrednu ulogu kod transformatora u pogonu, a to je da ukazuju na stanje i ispravnost transformatora kao cjeline. Rezultati ispitivanja uzoraka ulja ukazuju na stanje čitavog izolacionog sistema (ulja i celulozne izolacije), te na prisustvo nekih kvarova čije se postojanje ne može lako uočiti.

Pravilno uzimanje uzoraka je neophodan uslov da bi ispitivanje ulja transformatora bilo korektno, jer uzorak treba da reprezentuje pravo stanje ulja u transformatoru.

Brzina promjene karakteristika transformatorskog ulja određuje se redovnim ispitivanjem i poređenjem sa prethodno izmjerenim vrijednostima i tako približno procjenjuju njihove buduće promjene, odnosno budući vijek transformatorskog ulja. Tako se planiraju buduće intervencije i odlučuje o tome da li će se postojeće ulje moći još koristiti uz fizičku obradu sušenjem i filtriranjem, ili će se vršiti dolivanje novog ulje ili vršiti njegovu regeneraciju pomoću inhibitora i adsorbenata.

U slučaju dugogodišnje redovne, preventivne kontrole stanja i kvaliteta uzoraka ulja transformatora iz pogona, moguće je pratiti stvarnu promjenu karakteristika ulja pod pogonskim uslovima i porediti sa rezultatima ispitivanja uzoraka ulja tih istih transformatora kada su bila nova i laboratorijski vještački starena.

Na fizičke, hemijske i električne karakteristike ulja transformatora u eksploataciji utiču, pored kvalitete samog ulja, niz faktora koji mijenjaju stanje i kvalitet ne samo ulja već i ukupnog izolacionog sistema transformatora. To su na prvom mjestu spoljašnji uticaji (atmosferska vlaga i kiseonik iz vazduha), nečistoće zaostale u transformatoru ili nastale uslijed prisutnog kvara (gasovi, čestice uglja, metala, vlaknaca celuloze i dr.), radna temperatura ulja i namotaja, električna polja i pojave u vezi sa njima (parcijalna pražnjenja, električni luk), katalitičko dejstvo konstrukcionih metala (bakra, gvožđa, aluminijuma) i dr.

Na osnovu svega navedenog jasno je da je proces punjenja transformatora kvalitetnim novim uljem, praćenje i ispitivanje stanja tog ulja pod pogonskim uslovima, a na osnovu toga i procjene stanja i budućih intervencija na samom transformatoru, veoma kompleksan posao. Primjena međunarodnih i nacionalnih standarda te njihova međusobna i stalna sinhronizacija neophodan je uslov za kvalitetanu i sigurnu primjenu transformatorskih ulja.

Najbolja procena stanja i preostalog radnog veka transformatora u radu može da se načini primenom merenja indeksa DP primeraka izolacije namotaja uzetih iz različitih slojeva gornjih delova namotaja, ulaza u namotaje i sabirnica, drugim rečima sa mesta gde mogu da se očekuju najjača termička, mehanička i hemijska naprezanja.

Primena ovog postupka, odnosno razrada detalja njegove praktične implementacije i tumačenje rezultata merenja na generatorskom (blok) transformatoru snage 380 MVA predstavlja okosnicu ove doktorske disertacije. Primenjeni metod je invazivni, vrlo složen i uključuje mnogo opasnosti; stoga, on bi trebao da se pažljivo pripremi i izvrši: mestima uzorkovanja se – po pravilu – teško pristupa, otvaranje transformatora je neizbežno, što može da izazove različita zagađenja, posebno prodor vlage; zbog invazivnosti, može ponekad da bude teško da se sanira izolacija na mestima gde su uzorci uzeti zbog činjenice da prostor može često da bude ograničen i uzan, nepogodan za rad.

Procena starosti izolacije i preostalog radnog veka posredstvom koncentracije derivata furana nije pouzdana, pošto nijedna zadovoljavajuća korelacija DP - 2FAL još nije nađena. Sa druge strane, merenje ove koncentracije bi trebalo sigurno da se uključi u regularni program ispitivanja ulja (nadzora), zajedno sa metodom gasne hromatografije, zato što ima važnu preventivnu ulogu - porast koncentracije upozorava osoblje na starenje izolacije, ali njegov stepen treba da se odredi drugom metodom – neposrednim merenjem indeksa DP.

Rezultat sprovedenog postupka je da je procena da je preostali životni vek transformatora 13 godina. Tokom analiza doneu i sledeći zaključci i tične inženjerske preporuke. Za dati GT, potrebno je da se načine koraci za promenu izolacije sabirnica što je brže moguće papirom nove generacije. Ona je u vrlo lošem stanju i delimično nagore. Shodno tome, ona može lako da se odvoji sa bakra i (tako) zagađi ulje koje se sakuplja na namotajima ugrožavajući njegovu dielektričnu čvrstoću. Svi ovi uticaji postaju slabiji kada se ide niz namotaje i stoga se očekuje da je tu stanje bolje, što se može potvrditi merenjem.

Nakon saniranja, sabirnička veza treba da se pritegne i svi oštećeni delovi (bresoni) zamene. Savetuje se da se proverí mehanički napon unutrašnjih sabirničkih veza bar svake druge ili treće godine, posebno zato što se toplota lako prenosi na ulazne priključke namotaja, imajući na umu da je transformator star preko 32 godine, budući tako u svom »trećem delu života «.

Jako se preporučuje da se načini ponovljeno merenje indeksa DP, uključujući sabirničke veze svih tačaka u neposrednom susedstvu ulaza namotaja, uključujući nekoliko slojeva svake druge ili treće godine, da bi se precizno odredilo opadanje (smanjenje) kvaliteta izolacionog papira, kao i preostali životni vek, imajući na umu da stari transformatori brže stare nego novi pod istim uslovima. Potrebno je merenje 2FAL svake godine za uspostavljanje trendova.

Tokom regularne godišnje analize izolacionog ulja, merenje granulometrijskog sadržaja u ulju (broj i dimenzije čestica) bi trebalo da se uradi. U slučaju kada određeni parametri ulja, (npr. tg δ), odstupaju značajno od normalnih vrednosti, prisustvo nekih nemetalnih čestica može da se nađe IR analizom. Imajući na umu radni vek transformatora, kao i želju da se on produži što je više moguće, i posebno težnju da se poveća njegova nazivna snaga, vrlo je poželjno da se načini obrada

uljno – papirnog sistema da bi se odstranio sadržaj vlage; iako vrednosti ovog sadržaja mogu da budu unutar propisanih vrednosti, one su znano veće od onih za ulja sa novim kvalitetom.

LITERATURA

- [1] Pejović V., Brkić R., Bojković A., Dudaković P. "Izolaciona ulja" – Proučavanje činilaca koji utiču na karakteristike ulja za transformatore i prekidače, Beograd, 1973.
- [2] Lukić J., Jovanović Đ. "Nove metode za procenu kvaliteta izolacionih ulja", 2001.
- [3] Čabrac S. "Vrednovanje oksidacione stabilnosti izolacionih ulja prema različitim metodama ispitivanja", 1989
- [4] Orlović J., Pejović V. "Preventivna kontrola transformatora distributivnih mreža ispitivanjem stanja i kvaliteta transformatorskih ulja", 1998.
- [5] Knežević D., Pahor K. "Ispitivanje domaćih transformatorskih ulja" 1985.
- [6] Rajaković V. "Polihlorirani bifenili", Beograd, 2000.
- [7] Rajaković V., Drakić K., Pejović V. "Komparativne analize silikonskih i mineralnih ulja", Beograd, 2003
- [8] Orlović A., Pejović V. "Rerafinacija otpadnih mineralnih transformatorskih ulja" 1999.
- [9] Čabrac S. "Klasifikacija tekućih dielektrika", 1993
- [10] CIGRÉ Working Group 12-09 on Thermal Aspects: Lifetime Evaluation of transformers, *Electra*, No.150, pp 39-52, 1993.
- [11] M. Darveniza, T. K. Saha, D. J. T. Hill, T. T. Le, "Studies of the Condition of Insulation in Aged Transformers and Predicting its Remaining Life", CIGRÉ Symp. Berlin, Proceedings Paper 110-22, 1993.
- [12] A. de Pablo, R. Andersson, H. J. Knab, B. Pahlavanpour, "Furanic Compounds Analysis as a Tool for Diagnostic and Maintenance of Oil-Paper Insulation System", CIGRÉ Symp. Berlin, Proceedings Paper 110-09, 1993.
- [13] A. Pablo, B. Pahlavanpour, "Furanic Compounds Analysis: A Tool for Predictive Maintenance of Oil filled Electrical Equipment", *Elektra*, No 175, pp. 9-31, 1997.
- [14] M. K. Pradhan, T.S. Ramu, *On the Estimation of Elapsed Life of Oil-Immersed Power Trans-formers*, Dpt. of High Voltage Engineering, Indian Institute of Science, Bangalore, 2004.
- [15] CIGRÉ Working Group A2-18, Publication 227, *Life Management Techniques for Power Transformers*, 2003.
- [16] T. K. Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers", *IEEE Trans. Dielect. El. In.*, Vol 10, No. 5, pp. 903 – 917, 2003.
- [17] P. Osmokrović, S. Krstić, M. Ljevak, D. Novaković, "Influence of GIS parameters on the Topler Constant", *IEEE Trans. on Electr. Insul.*, Vol. 27, No. 2, pp. 214-220, 1992.
- [18] Z. Lazarević, R. Radosavljević, M. Pešić, P. Osmokrović, "Application of Kerr Electro-optic Effect to Electric Field Measurements in Transformer Oils", *J. Optoelectron. Adv. M.*, Vol. 8, No. 3, pp. 1273-1277, 2006.
- [19] P. Osmokrović, D. Filipović, M. Pešić, Z. Lazarević, "Transient Electric Field Measurement in the Liquid Dielectrics Using Computerized laser

- Tomography“, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 56, No. 6, pp. 2538-2547, 2007.
- [20] A. Leibfried, A.J. Kachler, W.S. Zaengl, V.D. Houhanessian, A. Kuchler, B. Breutenbauch, “Ageing and Moisture Analysis of Power Transformer Insulation Systems“, CIGRE Symp. Paris, Proceedings Paper 12-101, 2002.
- [21] J. Nejedly, G. Newesely, “Evaluation of the Extent of Ageing of Paper in Oil-Immersed Power Transformers“, CIGRE Symp. Paris, Proceedings Paper D1-302, 2004.
- [22] L.E. Lundgaard, W. Hansen, D. Linhjell, T.J. Painter, “Ageing of Oil-Impregnated Paper in Power Transformers“, IEEE Trans. Power Deliver., Vol 19, No.1, pp. 230-239, 2004.
- [23] C. Bengtsson, “Status and Trends in Transformer Monitoring“, IEEE Trans. Power Deliver., Vol. 11, No.3, pp. 1379-1384, 1996.
- [24] T. K. Saha, Z. T. Yao, T. T. Le, M. Darveniza, D. J. T. Hill, “Investigation of Interfacial Polarization Spectra Parameters for Accelerated Aged Oil-Paper Insulation and its Cor-relation with Molecular Weights and Furan compounds“, CIGRE Symp. Paris, Proceedings Paper 15-201, 2000.
- [25] R. LJ. Radosavljević, V. Milosavljević, A. M. Popović, M. Damjanović, “Temperature measurement of primary windings of transformers in the hydro-electric power plant »Djerdap I« rated 380 MVA, 2x15,75 kV / 420 kV, d5/d5/YN, OFWF under load after 30 years operation“, CIGRE Symp. Paris, Proceedings Paper A2-106, 2004.
- [26] Z. Lazarević, R. Radosavljević, P. Osmokrović, “A Novel Approach for Temperature Estimation in Squirrel-Cage Induction Motor Without Sensors“, IEEE Trans. Instrum. Meas., Vol. 48, No. 3, pp. 753-757, 1999.
- [27] L. Vereb, P. Osmokrović, M. Vujisić, Z. Lazarević, N. Kartalović, “Effect of insulation construction bending on stator winding failure“, IEEE Trans. Dielect. El. In., Vol. 14, No. 5, pp. 1302-1307, 2007.
- [28] L. Vereb, P. Osmokrovic, M. Vujisic, C. Dolicanin, K. Stankovic, “Prospects of Constructing 20 kV Asynchronous Motors“, IEEE Trans. on Dielectr. El. In., Vol. 16, No. 1, pp. 251-256, 2009.
- [29] K. Stankovic, M. Vujisic, Lj. Delic, “Influence Of Tube Volume On Measurement Uncertainty Of GM Counters“, Nucl. Technol. Radiat., Vol. 25, No. 1, pp. 46-50, 2010.
- [30] K. Stankovic, M. Vujisic, “Influence of radiation energy and angle of incidence on the uncertainty in measurements by GM counters“, Nucl. Technol. Radiat., Vol. 23, No. 1, pp. 41-42, 2008.
- [31] R. Evans, A. F. A. Wallis, “Cellulose Molecular Weights Determined by Viscosimetry“, J. Appl. Polym. Sci., Vol 37, No. 8, pp. 2331-2340, 1989.
- [32] M. Marx, “Über die Bestimmung de moleculargewichts von cellulose in kupferathylendiamin“, Das Papiers, helt 7/8, pp. 135, 1956.
- [33] M. Pešić, Z. Jeremić, M. Vujisić, P. Osmokrović, “Scaling law applicability to oil-insulated parallel-plate capacitors“, IEEE Trans. Dielect. El. In., Vol. 14, No. 4, pp. 1002-1006, 2007.
- [34] IEC 60076 – 7, ED. 1, “Loading Guide of Oil -Immersed Power Transformers“, 2004.
- [35] IEEE Std C57.91-1995, *Loading Guide of Mineral - Oil - Immersed Power Transformers*.
- [36] T. Kawamura, Y. Fushimi, T. Shimato, N. Amano, Y. Ebisawa, N. Hosokawa, Improvement in Maintenance of Economical Effectiveness of

- Transformers in Japan, CIGRÉ Symp. Paris, Proceedings paper 12-107, 2002.
- [37] K. Stanković, M. Pešić, P. Osmokrović, M. Vujisić: “ Surface Time Enlargment Law for Gas Breakdown”, IEEE Trans. on Dielect. El. In., Vol. 15, No. 4, pp. 994-1005, 2008.
 - [38] K. Stankovic, P. Osmokrovic, C. Dolicanin, M. Vujisic, A. Vasic, “Time enlargement low for pulse breakdown”, Plasma Source Sci. T., Vol. 18, article no. 025028, 12pp, 2009.
 - [39] P. Osmokrovic, S. Djekic, K. Stankovic, M. Vujisic, “Conditions for the applicability of the geometrical similarity law to gas pulse breakdown“, IEEE Trans. Dielect. El. In., Vol. 17, No. 4, pp. 1185-1195, 2010.
 - [40] L. Lungaard, W. Hansen, D. Linhjell, T. J. Painter, “Ageing of oil impregnated paper in Power Transformers”, IEEE Trans. Power Deliver., Vol. 19, No. 1, pp. 230 – 239, 2004.
 - [41] R. Müller, Th. Wörner, “Untersuchungen über die Alterungsbeständigkeit von Transformatorenölen, abhängig von ihrer Konstitution”, ETZ – A, Vol. 80, pp. 623, 1959.
 - [42] K. Potthoff, “Zum Langzeitverhalten Elektrischer Isolierstoffe bei thermischer Beanspruchung”, ETZ – A, Vol. 85, pp. 449, 1964.
 - [43] B. Gänger, “Kontrolle der Isolierölalterung und Pflege des Öles von Hochspannungstransformatoren und Meßwandlern”, ETZ – A, Vol. 84, pp. 800, 1963.
 - [44] P. Osmokrović, Z. Jeremić, M. Pešić, Z. Lazarević, “Influence of transformer oil particle contamination on dielectric hardness“, J. Optoelectron. Adv. M., Vol. 9, No 12, pp. 3885-3888, 2007.
 - [45] X. Chendong, “Monitoring Paper Insulation Ageing by Measuring Furfural Contents”, 7th International Symposium of High Voltage Engineering, Technische Universität Dresden, pp. 139-142, 1991.
 - [46] A. de Pablo, CIGRE WG 15-01-03, *Interpretation of Degradation Models of Furanic Compounds*, 1997.
 - [47] M. Vujisic, K. Stankovic, E. Dolicanin, B. Jovanovic, “Radiation effects in polycarbonate capacitors”, Nucl. Technol. Radiat., Vol. 24, No. 3, pp. 209-211, 2009.
 - [48] R. Müller, “Auswirkungen der Alterungsvorgänge in Transformatoren und Möglichkeiten zur Erhöhung der Alterungsbeständigkeit“, ETZ – A, Vol. 84, pp. 794, 1963.
 - [49] C. Brinkmann, *Die Isolierstoffe der Elektrotechnik*, Springer – Verlag, Berlin 1975.

Прилог 1.

Изјава о ауторству

Име и презиме аутора: SAFAA ISMAEL AL-MUSAWI

Број индекса: 2012/5079

Изјављујем

да је докторска дисертација под насловом

Евалуација преосталог радног века енергетског трансформатора високог напона у радним условима

- резултат сопственог истраживачког рада;
- да дисертација ни у целини, ни у деловима није била предложена за стицање друге дипломе према студијским програмима других високошколских установа;
- да су резултати коректно наведени и
- да нисам кршио/ла ауторска права и користио/ла интелектуалну својину других лица.

Потпис аутора

У Београду, 27. XII 2018.



Прилог 2.

**Изјава о истоветности штампане и електронске
верзије докторског рада**

Име и презиме аутора: SAFAA ISMAEL AL-MUSAWI

Број индекса: 2012/5079

Студијски програм: Енергетски претварачи и погони

Наслов рада: Евалуација преосталог радног века енергетског трансформатора високог напона у радним условима

Ментор: др Зоран Лазаревић, редовни професор

Потписан SAFAA ISMAEL AL-MUSAWI

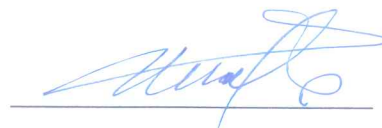
Изјављујем да је штампана верзија мог докторског рада истоветна електронској верзији коју сам предао/ла ради похрањена у **Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду**.

Дозвољавам да се објаве моји лични подаци везани за добијање академског назива доктора наука, као што су име и презиме, година и место рођења и датум одбране рада.

Ови лични подаци могу се објавити на мрежним страницама дигиталне библиотеке, у електронском каталогу и у публикацијама Универзитета у Београду.

Потпис аутора

У Београду, 27. XII 2018.



Прилог 3.

Изјава о коришћењу

Овлашћујем Универзитетску библиотеку „Светозар Марковић“ да у Дигитални репозиторијум Универзитета у Београду унесе моју докторску дисертацију под насловом:

Евалуација преосталог радног века енергетског трансформатора високог напона у радним условима

која је моје ауторско дело.

Дисертацију са свим прилозима предао/ла сам у електронском формату погодном за трајно архивирање.

Моју докторску дисертацију похрањену у Дигиталном репозиторијуму Универзитета у Београду и доступну у отвореном приступу могу да користе сви који поштују одредбе садржане у одабраном типу лиценце Креативне заједнице (Creative Commons) за коју сам се одлучио/ла.

1. Ауторство (CC BY)
2. Ауторство – некомерцијално(CC BY-NC)
3. Ауторство – некомерцијално – без прерада(CC BY-NC-ND)
4. Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима (CC BY-NC-SA)
5. Ауторство – без прерада(CC BY-ND)
6. Ауторство – делити под истим условима(CC BY-SA)

(Молимо да заокружите само једну од шест понуђених лиценци.

Кратак опис лиценци је саставни део ове изјаве).

Потпис аутора

У Београду, _____ 27. XII 2018.



1. **Ауторство.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце, чак и у комерцијалне сврхе. Ово је најслободнија од свих лиценци.

2. **Ауторство – некомерцијално.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела.

3. **Ауторство – некомерцијално – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела. У односу на све остале лиценце, овом лиценцом се ограничава највећи обим права коришћења дела.

4. **Ауторство – некомерцијално – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца не дозвољава комерцијалну употребу дела и прераду.

5. **Ауторство – без прерада.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, без промена, преобликовања или употребе дела у свом делу, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела.

6. **Ауторство – делити под истим условима.** Дозвољава се умножавање, дистрибуцију и јавно саопштавање дела, и прераде, ако се наведе име аутора на начин одређен од стране аутора или даваоца лиценце и ако се прерада дистрибуира под истом или сличном лиценцом. Ова лиценца дозвољава комерцијалну употребу дела и прераду. Слична је софтверским лиценцама, односно лиценцама отвореног кода.