

Procena stanja papirne izolacije energetskih transformatora na osnovu sadržaja 2-furfurala u mineralnom izolacionom ulju korigovanog na referentnu temperaturu od 20°C

Valentina Vasović¹, Draginja Mihajlović¹, Jelena Janković¹, Jelena Lukić¹

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

valentina.vasovic@ieent.org

Kratak sadržaj: Pouzdanost rada energetskih transformatora (ET) u mnogome zavisi od stanja izolacionog sistema, a pre svega papirne izolacije ET. Utvrđivanje stanja papirne izolacije energetskih transformatora koji se nalaze u upotrebi, nije moguće vršiti direktnim merenjima. Najšire prihvaćen način za procenu stanja papirne izolacije je ispitivanjem sadržaja 2-furfurala rastvorenog u izolacionom ulju uz korišćenje korelacija koje povezuju stepen polimerizacije papira i sadržaj 2-furfurala u izolacionom ulju. Koncentracija derivata furana u ulju u velikoj meri zavisi od sadržaja vlage u izolacionom sistemu ET, kao i sadržaja kiseonika i kiselina u ulju. U cilju boljeg uvida u kumulativni sadržaj 2-furfurala koji nastaje degradacijom papira, isključujući promene sadržaja 2-furfurala sa radnom temperaturom ulja, u ovom radu prikazan je dijagram zavisnosti stepena polimerizacije kraft papira od sadržaja 2-FAL u ulju korigovanog na referentnu temperaturu od 20°C i to za sadržaj vlage od 1-1,5% i 3-4%. Ovaj dijagram je verifikovan na 4 slučaja transformatora za koje su postojali podaci u bazi podataka Elektrotehničkog instituta Nikola Tesla. U budućnosti je potrebno ovaj dijagram dopuniti za sadržaj vlage od oko 2,5 %.

Ključne reči: energetski transformatori, papirna izolacija, degradacija, derivati furana, životni vek

1. Uvod

Izolacioni sistem energetskih transformatora (ET) punjenih uljem, čini izolaciono ulje i čvrsta izolacija. Čvrstu izolaciju ET čini papirna izolacija oko bakarnih namotaja, i određeni drugi materijali na bazi celuloze: presbord, prešpan, drvo... Tokom eksploatacije, izolacioni sistem ET stari pod uticajem

pogonskih činilaca. Trenutak kada papirna izolacija oko bakarnih namotaja ET ostari u tolikoj meri da je izgubila mehaničku čvrstoću, tj. zateznu čvrstoću i čvrstoću na istezanje i sposobnost da podnese dalja električna, a posebno mehanička naprezanja, smatra se krajem životnog veka ET. Najšire prihvaćen način za ocenu stanja papirne izolacije je stepen polimerizacije papira (DP). Kada je ova vrednost niža od 200, smatra se da je papir intenzivno degradiran i da je izgubio više od 30 % mehaničke čvrstoće [1], odnosno predstavlja nepouzdan izolacioni medijum. Ostarela čvrsta izolacija koja je u velikoj meri izgubila svoja mehanička svojstva, ali je dobro impregnisana uljem, dugo može da izdrži radni režim ET bez ili sa malim stresovima, međutim, bliski kratak spoj u sistemu, praćen jakim elektrodinamičkim silama, može da dovede do mehaničkih deformacija koje ostareli papir ne može da podnese, što dalje dovodi do međuzavojnog kratkog spoja i proboja izolacije.

Sve dok je ET u upotrebi, nije moguće vršiti ispitivanje papirne izolacije direktnim metodama, već se stanje papirne izolacije utvrđuje posredno. Degradacijom izolacionog papira nastaju određena jedinjenja rastvorna u izolacionom ulju, pomoću kojih se može vršiti procena ostarelosti čvrste izolacije ET u pogonu. Produkti starenja čvrste izolacije nazivaju se još i *markeri degradacije čvrste izolacije* i to su sledeća jedinjenja: ugljen-monoksid, ugljen-dioksid, voda, metanol (CH_3OH), etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) i derivati furana: 2-furfural (2-FAL), 2-furfuril-alkohol (2-FOL), 2-acetil-furan (2-ACF), 5- hidroksimetil-2- furfural (5-HMF), 5-metil-2-furfural (5-MEF) [2]. Svi navedeni produkti starenja izolacije nastaju kao posledica degradacije i celulozne izolacije i ulja, osim derivata furana koji nastaju isključivo kao posledica starenja celuloze. Kao takvi, derivati furana se smatraju selektivnim markerima degradacije čvrste izolacije i imaju najveći značaj u proceni stanja čvrste izolacije ET u pogonu i proceni kraja životnog veka ET.

Na osnovu dosadašnjih iskustava, utvrđeno je da se derivati furana javljaju relativno kasno, odnosno u poodmakloj fazi degradacije papira. U novije vreme se kao marker degradacije papira sve češće koriste metanol [3,4], jedinjenje koje nastaje u početnim fazama degradacije papira, pri čemu je pokazano i da je vrlo osetljiv na pojavu kvara u ET koji zahvata čvrstu izolaciju [5]. Ipak, metanol se ne može koristiti za procenu kraja životnog veka ET, jer u kasnijim fazama degradacije celuloze njegova koncentracija u ulju opada. U laboratoriji instituta Nikola Tesla, razvijena je metoda koja, u okviru analize sadržaja gasova rastvorenih u ulju, istovremeno detektuje i sadržaj metanola i etanola u ulju [6], što značajno olakšava praćenje stanja čvrste izolacije ET u pogonu.

Kao dopunske analize prilikom ocene stanja papirne izolacije na bazi sadržaja derivata furana u ulju, pored sadržaja metanola, često se koriste i sadržaji ugljenikovih oksida u ulju, a naročito odnos njihovih koncentracija - CO_2/CO . Tumačenjem ovih vrednosti mogu se izvesti dodatni zaključci o intenzitetu degradacije celulozne izolacije.

Praksa je pokazala da je derivat 2-FAL prisutan u ulju u najvećoj koncentraciji u odnosu na ostale derivate furana koji nastaju degradacijom celuloze, tako da predstavlja najvažiniji derivat prilikom procene ostarelosti

čvrste izolacije ET. U literaturi postoje mnoge jednačine koje povezuju izmerenu koncentraciju 2-FAL u ulju i DP papira [3,4,7] koje se koriste za procenu stanja papirne izolacije ET u pogonu. Ove jednačine su u glavnom nastale iz laboratorijskih eksperimenata i prilično su opšteg karaktera, odnosno nisu zavisne od temperature, sadržaja vlage, kiselina u ulju itd, što unosi značajnu grešku u proceni stanja papirne izolacije ET u pogonu.

U ovom radu prikazan je dijagram zavisnosti DP kraft papira od sadržaja 2-FAL u ulju preračunatog na 20 °C, za sadržaj vlage 1-1.5% i 3-4%, koji se može koristiti za procenu stanja papirne izolacije ET u pogonu na osnovu izmerenog sadržaja 2-FAL u ulju i procenjenog sadržaja vlage u papirnoj izolaciji. Verifikacija predloženog dijagrama izvršena je, na dostupnim podacima baze podataka instituta Nikola Tesla, na četiri slučaja ET koji su završili svoj životni vek.

2. Derivati furana u dijagnostici stanja papirne izolacije transformatora-ograničenja

Prilikom procene stanja papirne izolacije ET u pogonu na osnovu sadržaja derivata furana u ulju, nailazi se na nekoliko ograničenja u primeni.

Prvo ograničenje predstavlja činjenica da derivati furana u velikoj meri ostaju adsorbovani u celulozi, a samo manji procenat biva rastvoren u ulju. Istraživanja su pokazala da koeficijenti ravnotežne raspodele furana u sistemu papir-ulje u velikoj meri zavisi od ostarelosti papirne izolacije ET, ali i od ostalih parametara kao što su: temperatura ulja, sadržaj vlage, kiseonika i/ili kiselina u ulju [3,4,7]. Kao posledica promene ravnotežnih koncentracija derivata furana u sistemu papir-ulje pod dejstvom raznih uticaja, u realnim transformatorima često dolazi do fluktuacije apsolutnih koncentracija derivata furana u ulju, pri čemu je od velike važnosti utvrditi da li je došlo i do degradacije papirne izolacije, ili samo do uspostavljanja novih ravnotežnih koncentracija. Rezultati eksperimentalnih istraživanja [7,8] pokazuju da je uticaj ovlaženosti izolacionog sistema na raspodelu derivata furana između ulja i papira značajan. S druge strane, uticaj temperature na rastvorljivost 2-furfurala u ulju je daleko veći kod suve izolacije nego kod ovlaženog izolacionog sistema [7]. Važno je napomenuti da pored nabrojanih faktora, značajan uticaj na koeficijente raspodele, ali i na samo formiranje derivata furana ima i tip izolacionog papira.

Drugo ograničenje predstavlja činjenica da prilikom bilo kakve obrade ulja ET dolazi do uklanjanja derivata furana koji su do tog trenutka bili rastvoreni u ulju, dok određeni procenat ovih jedinjenja zaostaje rastvoren u papiru. Prilikom ponovnog ulaska transformatora u pogon dolazi do uspostavljanja nove ravnotežne koncentracije furana u sistemu papir-ulje. Za preciznu procenu stanja čvrste izolacije ET veoma je važno koristiti ukupan sadržaj furana nastao degradacijom papirne izolacije tokom svih godina pogona. Ukoliko je tokom pogona ET vršena jedna ili više obrada ulja, treba sabirati

priraste sadržaja furana u ulju u odnosu na uspostavljeno ravnotežno stanje nakon svake završene obrade. S obzirom da nije poznato koliko je vremena potrebno da se uspostavi ravnotežna raspodela derivata furana u izolacionom sistemu ET tokom pogona, često je teško proceniti da li je nakon obrade ulja dolazilo do dalje degradacije papira ili je u pitanju samo rastvaranje derivata furana iz papira u ulje.

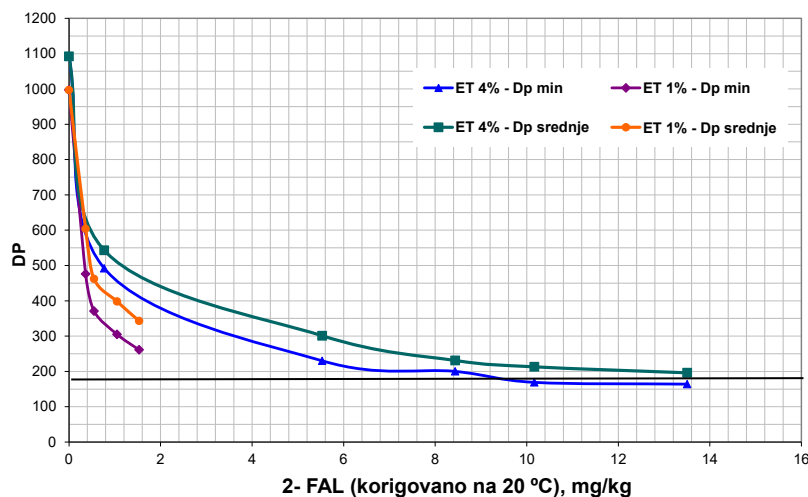
Treće ograničenje predstavlja činjenica da je prilikom procene stanja celulozne izolacije, na bazi sadržaja derivata furana u ulju, neophodno znati tačnu radnu temperaturu ispitnog ulja, kao i sadržaj vlage u celuloznoj izolaciji ET. Sadržaj vlage u celuloznoj izolaciji se ne može direktno meriti dok je transformator u upotrebi, već se vrši procena ovlaženosti izolacije putem električnih ili hemijskih metoda, što unosi dodatnu grešku u konačnu procenu ostarelosti izolacije.

J.Jalbert and M.-C. Lessard u svojim radovima [3,9,10] predložili su način preračunavanja izmerene koncentracije određenih derivata furana u ulju uzorkovanom na radnoj temperaturi ET na referentnu temperaturu od 20 °C. Na ovaj način, može se isključiti uticaj temperature na porast sadržaja derivata furana u ulju prilikom praćenja stepena degradacije papirne izolacije određenog ET kroz vreme, ali nije isključen uticaj vlage i sadržaja kiselina u ulju.

3. Korelacije sadržaja derivata 2-FAL svedenog na 20 °C i stepena polimerizacije papira DP

U cilju procene uticaja sadržaja vlage na brzinu degradacije čvrste izolacije u realnim transformatorima, sprovedena su istraživanja, od strane V. Vasović i saradnika, na dva identična eksperimentalna transformatora 300 kVA, izolovanih Kraft papirom i mineralnim uljem, različitih početnih sadržaja vlage u izolacionom sistemu [11]. Ukupna masa presborda i Kraft papira je bila oko 30 kg, odnosno oko 9 % u odnosu na ukupnu masu mineralnog ulja koja je iznosila oko 350 kg. Radne temperature ulja predmetnih transformatora održavane su na 105 °C, u pogonu su bili 460 dana i dostigli su kraj životnog veka, odnosno DP vrednost ispod 200. Transformatori su projektovani i izrađeni za potrebe istraživanja, tako da je bilo moguće povremeno uzorkovati papirnu izolaciju bakarnih namotaja, a da se pri tom ne ugrozi pogonska spremnost transformatora. Uzorkovanje papirne izolacije i ulja vršeno je u sledećim intervalima: početno, nakon 130, 180, 300, 400 i 460 dana. Među publikovanim rezultatima ovih istraživanja, nalaze se i dijagrami zavisnosti DP kraft papira od sadržaja 2-FAL u ulju za dva različita sadržaja vode u papirnoj izolaciji (oko 1% i oko 4%) [11]. Korišćenjem publikovanih rezultata i jednačine za preračunavanje sadržaja 2-FAL u ulju na referentnu temperaturu od 20 °C [9, 10], napravljen je i u ovom radu prikazan , dijagram zavisnosti DP kraft papira od referentnog sadržaja 2-furfurala u ulju (preračunato na 20 °C), Slika 1. Na pomenutom dijagramu su prikazane krive zavisnosti srednje DP vrednosti izolacionog kraft papira u ET i minimalne DP vrednosti

izolacionog kraft papira u ET od koncentracije 2-FAL u ulju na temperaturi od 20 °C, za sadržaj vlage u celulozi 1-1.5% i 3-4%.



Slika 1. Zavisnost stepena polimerizacije kraft papira (DP) od referentne koncentracije 2-FAL (preračunate na 20C) za sadržaj vlage oko 1 % i oko 4%

Prikazani dijagram omogućava procenu stanja kraft papira ET u pogonu na osnovu sadržaja 2-FAL u mineralnom izolacionom ulju, za ovlaženost izolacionog sistema od 1-1.5% odnosno 3-4%, pri čemu je anuliran uticaj temperature na rastvorljivost 2-FAL u ulju.

4. Procena stanja papirne izolacije ET u pogonu na osnovu referentne koncentracije 2-FAL- primeri iz prakse

U cilju utvrđivanja koliko je tačna procena stanja papirne izolacije ET u pogonu primenom dijagrama prikazanog na Slici 1, neophodno je vršiti poređenje izmerenih DP vrednosti za transformatore kod kojih je tokom pogona praćen sadržaj 2-FAL u ulju. Osim toga, neophodno je da sadržaj vlage u čvrstoj izolaciji predmetnog ET bude 1-1.5% ili 3-4% i to u periodu kada je meren i sadržaj 2-FAL u ulju. Stepenn polimerizacije papira se često razlikuje po visini namotaja i najčešće je u gornjim zonama niži nego u donjim, jer su temperature namotaja u gornjoj zoni više. Zbog toga je za kvalitetnu ocenu stanja papirne izolacije namotaja neophodno izmeriti veći broj uzoraka papira, što je u praksi retko. Dijagram prikazan na Slici 1. omogućava da se na osnovu sadržaja 2-FAL u ulju preračunatnog na 20 °C, proceni minimalna vrednost DP papira u ET, kao i srednja vrednost DP papira u ET.

Izvršena je pretraga baze podataka instituta Nikola Tesla i izdvojeno je nekoliko ET kod kojih je vršeno ispitivanje stepena polimerizacije papira nakon završenog životnog veka. Ni u jednom slučaju nije ispitano dovoljno uzoraka papirne izolacije za kvalitetnu ocenu njenog stanja, a procenjeni sadržaj vlage u papiru je kod jednog ET bio oko 2 – 2,5 %, te je za ovaj slučaj bilo neophodno aproksimirati krivu za pomenuti sadržaj vlage. Sadržaj vlage u papirnoj izolaciji predmetnih transformatora procenjen je na osnovu merenja sadržaja vode u ulju primenom “Perrier-Lukic” ravnotežnih dijagrama raspodele vlage u papirno uljnoj izolaciji [12].

U nastavku su dati podaci o merenjima sadržaja 2-FAL i procenjenim sadržajem vlage u izolaciji za četiri ET. Ukupni priraštaj sadržaja 2-FAL u ulju za transformatore ET3 i ET4 izračunat je sabiranjem pojedinačnih priraštaja nakon svake obrade ulja. Izmerene vrednosti stepena polimerizacije uzoraka papira prikazane su u tabelama 1b -4b.

Primer 1 – Distributivni transformator, 110/35 kV, 36 MVA, u pogonu od 1970. godine, označen kao ET1

Rezultati ispitivanja za transformator označen kao ET1 dati su u tabelama 1a i 1b.

Tabela 1a Rezultati ispitivanja sadržaja 2-FAL u ulju i procene sadržaja vlage u ulju tokom pogona kod ET1

Datum ispitivanja	T ulja, °C	2-FAL, ppm	2-FAL na 20 °C, ppm [4]	Procena sadržaja vlage u papiru, %
05/2016				2,76
09/2016	42	4,72	3,81	/
03/2017	44	4,40	3,49	/

Tabela 1b Rezultati ispitivanja DP papira tokom remonta kod ET1

Datum ispitivanja	Mesto uzorkovanja papira	DP vrednost
04/2018	Izvod dole	232
	Izvod gore	321
	Veze	281

Ukoliko se aproksimira da je kriva za 2,5 % sadržaj vlage i srednju DP vrednost negde na sredini između krivih za 1-1,5% i 3-4 %, može se proceniti da vrednosti 2-FAL preračunatoj na 20 °C od oko 3,6 ppm (Tabela 1a) odgovara srednja DP vrednost od oko 300. Izmerene vrednosti (Tabela 1b) ukazuju da je starenje papira bilo prilično ujednačeno po visini namotaja, pa se može zaključiti da je procenjena vrednost bliska realnim vrednostima.

Primer 2 – Distributivni transformator, 110/35 kV, 70 MVA, u pogonu od 1971. godine, označen kao ET2

Rezultati ispitivanja za transformator označen kao ET2 dati su u tabelama 2a i 2b.

Tabela 2a Rezultati ispitivanja sadržaja 2-FAL u ulju i procene sadržaja vlage u ulju tokom pogona kod ET2

Datum ispitivanja	T ulja, °C	2-FAL, ppm	2-FAL na 20 °C, ppm [4]	Procena sadržaja vlage u papiru, %
02/2008	50	6,82	5,09	3,29

Tabela 2b Rezultati ispitivanja DP papira tokom remonta kod ET2

Datum ispitivanja	Mesto uzorkovanja papira	DP vrednost
04/2010	Namotaj srednjeg napona	323
	Namotaj visokog napona	323
	Namotaj tercijera	315

Primenom dijagrama sa Slike 1, može se zaključiti da sadržaj 2-FAL preračunat na 20 °C od oko 5 ppm, za sadržaj vlage od 3,3 % (Tabela 2a) odgovara srednjoj vrednosti DPa od 300 do 350 jedinica, što se u zadovoljavajućoj meri slaže sa izmerenim vrednostima DP-a na uzorcima uzetim iz transformatora, Tabela 2b.

Primer 3 – Blok transformator instaliran u termoelektrani, 410/22 kV, 410 MVA, u pogonu od 1987. godine, označen kao ET3

Rezultati ispitivanja za transformator označen kao ET3 dati su u tabelama 3a i 3b.

Tabela 3a Rezultati ispitivanja sadržaja 2-FAL u ulju i procene sadržaja vlage u ulju tokom pogona kod transformatora ET3

Datum ispitivanja	T ulja, °C	2-FAL, ppm	2-FAL na 20 °C, ppm [4]	Procena sadržaja vlage u papiru, %
04/2004	60	0,45	0,30	0,31
04/2007	64	1,05	0,68	0,86
Obrada ulja				
05/2008	66	0,79	0,50	/

Datum ispitivanja	T ulja, °C	2-FAL, ppm	2-FAL na 20 °C, ppm [4]	Procena sadržaja vlage u papiru, %
06/2011	70	0,54	0,57	0,63
12/2012	56	1,22	0,86	1,00
01/2013	52	1,19	0,87	1,09
02/2013	48	1,26	0,96	/
02/2013	49	1,32	0,99	2,06
03/2013	50	1,22	0,91	/
06/2013	56	1,27	0,89	2,14
08/2013	60	1,57	1,06	1,22
02/2014	43	1,49	1,19	1,65
Ukupni priraštaj 2- FAL = 1,19 -0,50 + 0.68 = 1.37 ppm				

Tabela 3b Rezultati ispitivanja stepena polimerizacije papira, kod transformatora ET3

Datum ispitivanja	Mesto uzorkovanja papira	DP vrednost
02/09/2016	Faza B, namotaj visokog napona 20. kolut	437
	Faza B, namotaj visokog napona, 2. kolut	247

Ukupni priraštaj sadržaja 2-FAL u ulju za transformator ET3 izračunat je sabiranjem priraštaja sadržaja 2-FAL u ulju nakon svake obrade ulja. Koncentracije 2-FAL u ulju izmerena neposredno nakon obrade ulja je oduzeta jer se smatra posledicom rastvaranja 2-FAL iz papira u ulje, a ne posledicom dalje degradacije papira.

Primenom dijagrama prikazanog na Slici 1. datog za sadržaj vlage 1 – 1,5 %, procenjuje se da ukupni sadržaja 2-FAL preračunat na 20°C od 1,37 ppm, Tabela 3a, odgovara sledećim DP vrednostima papira: DP_{min} ≈ 270, i DP_{srednje} ≈ 350. Poređenjem minimalne izmerene DP vrednosti (Tabela 3b) sa procenjenom minimalnom DP vrednošću od 270, može se zaključiti da postoji izvesno slaganje.

Primer 4 – Blok transformator instaliran u termoelektrani, 16/420 kV, 360 MVA, u pogonu od 1979. godine, označen kao ET4

Rezultati za transformator označen kao ET4 dati su u tabelama 4a i 4b.

Tabela 4a Rezultati ispitivanja sadržaja 2-FAL u ulju i procene sadržaja vlage u ulju tokom pogona kod transformatora ET4

Datum ispitivanja	T ulja, °C	2-FAL, ppm	2-FAL na 20 °C, ppm [4]	Procena sadržaja vlage u papiru, %
03/2005	50	1,19	0,89	
02/2006	58	2,73	1,88	
Obrada ulja				
02/2007	44	1,93	1,53	
05/2007	58	2,05	1,41	
06/2007	25	1,88	1,80	
Obrada ulja				
12/2007	34	1,00	0,88	
01/2008	28	1,64	1,52	
Obrada ulja				
02/2008	46	1,49	1,16	1,69
Obrada ulja				
03/2008	48	1,00	0,76	
02/2009	35	1,52	1,32	
08/2009	50	1,69	1,26	1,52
03/2010	40	1,67	1,38	1,00
Ukupni priraštaj 2- FAL = 1,88+1,80-1,53+1,52-0,88+1,38-0,76 = 3,41 ppm				

Ukupni priraštaj 2-FAL u ulju od početka eksploatacije ET, preračunat na 20 °C (Tabela 4a) izračunat je sabiranjem vrednosti sadržaja 2-FAL u ulju izmerenih neposredno pre uzorkovanja papirne izolacije i neposredno pre obrade ulja, a od tog zbira su oduzete vrednosti sadržaja 2-FAL u ulju neposredno nakon svake obrade ulje. Vrednosti nakon obrade su oduzete, jer se za te vrednosti pretpostavlja da su posledica rastvaranja 2-FAL iz celuloze, i uspostavljanja novih ravnotežnih koncentracija, a ne posledica dalje degradacije celuloze.

Kriva za sadržaj vlage od 1 – 1,5 % prikazan na Slici 1, ne postoji za sadržaj 2-FAL= 3,43 ppm. Pretpostavka da je trend ove krive sličan trendu krive za 3-4 % vlage, pa bi procenjene DP vrednosti bile: DP_{min}≈ 200, a

DPsrednje \approx 250. Međutim, izmerene DP vrednosti na uzorcima uzetim iz transformatora, Tabela 4b, ne odgovaraju procenjenim DP vrednostima na ovaj način. Izmerene DP vrednosti više odgovaraju procenama koje se dobijaju uzimanjem poslednje izmerene i preračunate vrednosti 2-FAL. Tako se za 2-FAL=1,38 ppm, dobijaju sledeće vrednosti za procenjeni DP papira: DPmin \approx 270, i DPsrednje \approx 350. Na osnovu ovoga bi se moglo zaključiti da je sve vreme tokom pogona, zbog čestih obrada ulja, dolazilo samo do konstantnog rastvaranja 2-FAL u ulju, a ne i do dalje degradacije papira i stvaranja 2-FAL. Nažalost, DP merenja nisu izvršena na dovoljnom broju uzoraka papira za potvrdu jednog ili drugog načina procene.

Tabela 4b Rezultati ispitivanja stepena polimerizacije papira, kod transformatora ET4

Datum	Mesto uzorkovanja papira	DP vrednost
22/07/2010	Faza B, NN namotaja	309
	Faza C, NN namotaja	425

5. Zaključak

Stanje čvrste izolacije ET tokom pogona se najčešće procenjuje na osnovu sadržaja derivata furana u ulju, pre svega sadržaja 2-furfurala, i korelacija koje postoje u literaturi, a povezuju stepen polimerizacije papira i koncentraciju furana u ulju. U cilju što tačnije procene stanja papirne izolacije, neophodno je redovno pratiti sadržaj derivata furana u ulju, naročito nakon obrade izolacionog sistema ET. Osim sadržaja furana, neophodno je pratiti i sadržaj vode u ulju i prilikom svakog uzorkovanja ulja beležiti radnu temperaturu ulja. Korišćenjem jednačina za preračunavanje sadržaja 2-FAL na temperaturu od 20 °C datim u literaturi [4], uspešno se isključuje uticaj promene radne temperature ulja na priraštaj 2-FAL u ulju tokom pogona ET, ali je za preciznu procenu stanja čvrste izolacije isto to potrebno uraditi za uticaj vlage i sadržaja kiselina u ulju. U ovom radu prikazan je dijagram zavisnosti stepena polimerizacije kraft papira od sadržaja 2-FAL u ulju svedenog na referentnu temperaturu od 20 °C, za sadržaj vlage u papiru od oko 1-1,5 % i oko 3-4%. Na ovaj način postiže se preciznija procena DP vrednosti, anulira se uticaj temperature na migraciju furana i istovremeno se kroz DP-2-FAL krive za dva različita sadržaja vode uključuje uticaj sadržaja vode na koncentraciju 2-FAL, tj. precizniju procenu DP-a.

Procena stanja čvrste izolacije na osnovu prikazanog dijagrama je verifikovana na 4 transformatora za koje su postojali neophodni podaci. Ovaj dijagram je potrebno dalje verifikovati kroz nove slučajeve ET koji su završili svoj radni vek, a tokom pogona je praćen sadržaj derivata furana i vode u ulju. U narednom periodu neophodno je upotpuniti krive starenja sa podacima za srednji sadržaj vode (2,5%), a krivu za sadržaj vode 1% dopuniti za veće

koncentracije 2-FAL u ulju. Na ovaj način bi se dobio veoma dobar dijagnostički alat za procenu potrošenog životnog veka ET u pogonu.

Zahvalnica

Rezultati prikazani u ovom radu podržani su od strane projekta broj TR 33024 Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije

Literatura

- [1] T.A. Prevost, "Estimation of Insulation Life Based on Dual Temperature Ageing Model", *Weidmann – ACTI Inc. 5Th Annual Technical Conference*, Novemeber 2006
- [2] B. Pahlavanpour, "Experimental Investigation in to the Thermal Aging of Kraft Paper and Mineral Insulating Oil," *IEEE International Symposium on Electrical Insulation*, Boston, MA USA, April 2002, pp. 341-345
- [3] CIGRE Technical Brochure, "Furanic compounds for diagnosis," no. 494, 2012.
- [4] CIGRE Technical Brochure, "Ageing of liquid impregnated cellulose for power transformers", no. 738, 2018
- [5] V.Vasović, J.Janković, D.Mihajlović, J.Lukić, Đ.Jovanović, D.Žukovski, M. Cvijanović, „Interesantni slučajevi djagnostike stanja energetskih transformatora nakon kvara i havarije tokom 2017 i 2018 godine: Unapređenje dijagnostike primenom novih metoda i post-mortem analiza“, *34. savetovanje CIGRE Srbija*, 2 – 6.06.2019, Vrnjačka Banja
- [6] D.Mihajlović, J.Janković, V.Vasović, J.Lukić „Metode za produženje životnog veka transformatora – od dijagnostike stanja do postupaka revitalizacije“, *V savetovanje, CG CO CIGRE*, 09.– 12.05.2017, Bečići
- [7] CIGRE Technical Brochure, "Aging of solid insulation," no.323, 2007
- [8] G.Csepes, I. Kispal, J. Fekete, Z. Romvari, M.Syebeni, A. Bognar, E. Uri and S. Babos, „ Correlation Between Electrical and Chemical Testing Techniques for Assessing Degradation of oil-paper insulation“, *Intern. Conf. Large HV, Electric Systems, CIGRE*, Paris, France, Paper No. 15-202, 1998.
- [9] J. Jalbert, M.-C. Lessard, and M. Ryadi, "Cellulose Chemical Markers in Transformer Oil, Insulation Part 1: Temperature Correction Factors," *IEEE Trans. Dielect, Electr, Insul.*, vol. 20, pp. 2287-2291, Dec 2013.
- [10] M.-C. Lessard, J. Jalbert, M. Ryadi, and leee, "Establishing Correction Factors for the Partitioning of Furanic Derivatives between Oil and Paper Insulation," in *2013 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena*, 2013, pp. 132-135.

- [11] V. Vasovic, J. Lukic, D. Mihajlovic, B. Pejovic, Z. Radakovic, U. Radoman and A. Orlovic, "Aging of Transformer Insulation - Experimental Transformers and Laboratory Models with different Moisture Contents: Part I – DP and Furans Aging Profiles," *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul, IEEE Transaction on Dielectrics and Insulation*, vol. 26, no. 6, 2019.
- [12] V. Vasovic, J. Lukic, C. Perrier, M.-L. Coulibaly, "Equilibrium Charts for Moisture in Paper and Pressboard Insulations in Mineral and Natral Ester Transformer Oil," *IEEE Electr. Insul. Mag*, vol. 30, no. 2, 2014.

Abstract. The reliability of power transformers operation largely depends on the insulation system condition, especially on the condition of paper insulation. Determining the condition of paper insulation of transformers in use cannot be made by direct measurements. The most common way of assessing the paper insulation condition is by analyzing the content of 2-furfural dissolved in the insulating oil and by applying correlations between the degree of paper polymerization and the 2-furfural content in the insulating oil. The concentration of 2-furfural in the oil depends on the moisture content of the insulation system and the oxygen and acid content in the oil. In order to gain a better insight into the cumulative content of 2-furfural produced by paper degradation, excluding changes in the 2-furfural content caused by migration between paper and oil at different operating temperatures, dependence of the degree of polymerization of kraft paper to 2-FAL content in the oil, corrected to a reference temperature of 20°C, for a moisture content in cellulose of 1-1.5% and 3-4% is presented in this paper. This diagram has been verified on 4 transformers according to available data from the database of the Electrical Engineering Institute Nikola Tesla. In the future, this diagram should be completed for moisture content of 2.5% in cellulose insulation.

Keywords: power transformers, paper insulation, degradation, furan derivatives, lifetime, condition assessment

Evaluation of Paper Insulation of Power Transformers Based on the Content of 2-furfural in Mineral Oil Corrected to a Reference Temperature of 20°C

Valentina Vasović, Draginja Mihajlović, Jelena Janković, Jelena Lukić

Rad primljen u uredništvo: 06.11.2019. godine.

Rad prihvaćen: 03.12.2019. godine.