

VIII. PREVENTIVNA KONTROLA TRANSFORMATORA ISPITIVANJEM ULJA

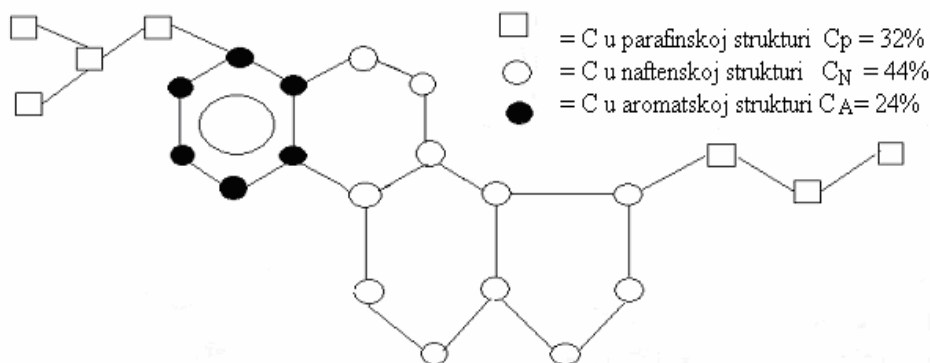
U ovom poglavlju prikazan je pregled dugogodišnjeg rada na ispitivanju transformatorskih ulja iz pogona, kao i novih ulja domaćih i stranih proizvođača, tokom protekle četiri decenije.

Dat je prikaz problematike mešanja ulja raznih proizvođača i kvaliteta proizvedenih iz parafinske i naftenske baze, poboljšanje stanja i kvaliteta ostarelih ulja regeneracijom adsorbentima i inhibiranjem. U radu su istaknuti karakteristični primeri koji su u pogonskim uslovima predstavljali problem.

VIII.1. HEMIJSKI SASTAV I KARAKTERISTIKE ULJA

Izolacioni sistem transformatora i druge visokonaponske opreme čine izolaciono ulje i u ulju impregnirana celulozna izolacija. Ulja koja se koriste kao izolacione tečnosti u našoj zemlji su mineralnog porekla. Iako se mineralno ulje u svetu i kod nas koristi preko 100 godina u transformatorima, ono i danas nudi, u odnosu na druge izolacione tečnosti, najbolji kompromis cena/performance. To isto se može reći i za kompatibilnost ulja sa konstrukcionim materijalima transformatora. Druge sintetičke i mnogo skuplje izolacione tečnosti kao što su silikonska ulja, organski estri i sl. se koriste samo u specifičnim slučajevima kada neke od njihovih karakteristika opravdavaju visoku nabavnu cenu. Poseban slučaj su sintetičke tečnosti, polihlorovani bifenili, PCB, poznate kao "askarele" koje se već odavno ne proizvode ali se još uvek mogu naći u eksploataciji u transformatorima sa posebnom namenom i u kondenzatorima. U našoj zemlji je najrasprostranjeniji "piralen" pa se najčešće susreću "piralenski transformatori". Zbog kancerogenih osobina same tečnosti a posebno međuprodukata njihovog razaranja, eksploatacija PCB-a je zabranjena u većini zemalja u svetu pa zabranu treba očekivati uskoro i u našoj zemlji.

Mineralna transformatorska ulja se proizvode iz sirove nafte i predstavljaju rafinisane vakuum destilate odgovarajuće viskoznosti. Po svom hemijskom sastavu predstavljaju smešu naftenskih, parafinskih u aromatskih ugljovodonika povezanih u molekularne strukture različitih vrsta. Na sl.I je prikazan jedan tipičan molekul transformatorskog ulja.



Slika I. Tipičan molekul transformatorskog ulja

U zavisnosti od toga da li je ulje proizvedeno iz naftenske ili parafinske nafte ono sadrži veći ili manji procenat naftenskih odnosno parafinskih ugljovodonika pa se u zavisnosti od toga ulja dele na *parafinska* i *naftenska*. Sadržaj treće grupe ugljovodonika, aromatskih, koji je i najvažniji za kvalitet ulja, sličan je kod oba tipa i kreće se od 4 - 18%. Ulja se dalje dele na *inhibirana* i *neinhibirana* u zavisnosti da li u svom sastavu sadrže prirodni inhibitor oksidacije ili je on naknadno dodat u procesu proizvodnje ulja kod inhibiranih ulja. Praksa i dugogodišnje iskustvo su pokazali da su sve ove podela ulja veštačke, da je za upotrebu ulja kao izolacionog i rashladnog sredstva najvažniji njegov kvalitet koji se proverava ispitivanjem karakteristika ulja u hemijskoj laboratoriji. To praktično znači da transformatorsko ulje, kako novo tako i ono iz eksploatacije, mora da ima odgovarajuće vrednosti svojih karakteristika propisane odgovarajućim standardima.

Da bi se izolaciona ulja u transformatorima mogla koristiti kao izolaciono i rashladno sredstvo moraju imati odgovarajuće fizičke, hemijske i električne karakteristike. Da bi ulje zadovoljilo osnovnu ulogu u transformatoru a to je da izoluje delove pod naponom, mora da ima visoku dielektričnu čvrstoću, mali sačinitelj dielektričnih gubitaka i visok specifični električni otpor. Uslov za to je da pored dobrog kvaliteta ugrađenih materijala izolacioni sistem mora da bude suv, sa malim sadržajem vode koji se meri u ulju u milionitim delovima, ppm., što se postiže dobrom obradom ulja i aktivnog dela transformatora prilikom prvog punjenja uljem u toku proizvodnje ili remonta u fabrici ili remontnoj radionici, zatim odgovarajućom zaštitom sistema u toku eksploatacije od prodiranja spoljašnje atmosferske vlage. Voda nastaje i u toku eksploatacije transformatora kao jedan od produkata starenja ulja pa je uslov za dugogodišnju upotrebu izolacionog sistema transformatora upotreba ulja sa dobrim hemijskim karakteristikama. Na prvom mestu to je oksidaciona stabilnost ulja ili otpornost ulja prema starenju kojem je ulje podložno u toku dugogodišnje eksploatacije pod raznim uticajima kao što su radna temperatura, rastvoren kiseonik, katalitičko dejstvo kiselih produkata starenja ulja, metalnih konstrukcionih delova i sl. Da bi ulje zadovoljilo svoju drugu osnovnu ulogu da vrši hlađenje izolacionog sistema transformatora, ono mora da bude dovoljno pokretljivo, odnosno da ima dobre osnovne fizičke karakteristike kao što je viskoznost, niskotemperaturne karakteristike, gustina i sl. što se postiže prilikom odabira odgovarajuće sirovine za proizvodnju ulja i samog procesa proizvodnje. Navedene i druge karakteristike ulja se proveravaju ispitivanjem u hemijskoj laboratoriji po metodama standardizovanim u stranim i domaćim standardima. Ulje zadovoljava za upotrebu u visokonaponskoj opremi ako zadovoljava sve kriterijume definisane u osnovnim standardima i to za svaku pojedinačnu karakteristiku ulja.

VIII.2. NOVA TRANSFORMATORSKA ULJA

Ispitivanje stanja i kvaliteta novih transformatorskih ulja koja se koriste za nalivanje novih transformatora ili za dolivanje ulju transformatora iz pogona je veoma važno. Ulje u transformatoru treba da traje koliko i sam transformator pa je od presudne važnosti da prvo punjenje novog transformatora bude sa novim uljem dobrog kvaliteta i dobro obrađeno sušenjem i filtriranjem. Ulje lošeg kvaliteta pod pogonskim uslovima ubrzano stari, produkti starenja ulja ubrzavaju degradaciju celuloznih vlakana papirne izolacije aktivnog dela transformatora, nataloženi produkti starenja u kanalima sa prinudnom cirkulacijom ulja otežavaju hlađenje, transformator se pregreva, jednom rečju skraćuje se njegova životna dob. Dugogodišnja praksa je pokazala da svaka naknadna intervencija na ulju iz eksploatacije, u smislu zamene ostarelog ulja novim uljem, naknadno sušenje ili filtriranje ulja sa ili bez regeneracije i inhibiranja je

ekonomski neopravdana i mnogo skuplja nego prvo punjenje transformatora novim, suvim uljem dobrog kvaliteta. U hemijskoj laboratoriji se stoga posebna pažnja posvećuje izboru i proveru kvaliteta novog transformatorskog ulja što je prvenstveno u interesu korisnika.

Novo ulje dobrog kvaliteta mora da zadovolji kriterijume definisane u važećem standardu JUS B.H3 561/1987 god. "*Izolaciona mineralna ulja za transformatore i električne rasklopne aparate*"- Opšti tehnički uslovi, (čija je revizija u toku) koji je u skladu sa međunarodnim standardom IEC 60296/2003 god. i da odgovara vrednostima datim u prpratnom atestu proizvođača ulja. To posebno važi za novi tip ulja koji se po prvi put ispituje u hemijskoj laboratoriji, *tipsko ispitivanje*, sa kojim se nema pogonskog iskustva. Da bi se izvršila korektna provera kvaliteta ulja, niz postupaka kao što je skladištenje, transport i uzimanje uzoraka za analizu moraju biti tako sprovedeni da se maksimalno zaštiti uzorak ulja od spoljašnjeg zagađenja što je definisano u odgovarajućem standardu za uzimanje uzoraka ulja JUS B.H3.566/1986 god.

Izveštaj Instituta „Nikola Tesla“, pored rezultata ispitivanja uzorka novog ulja sadrži i mišljenje o kvalitetu ulja kao i preporuku za njegovu upotrebu ukoliko su rezultati zadovoljavajući. Zahvaljujući ovakvom pristupu ispitivanju kvaliteta novih transformatorskih ulja, od 1980-te godine nabavljana su na Jugoslovenskom tržištu ulja samo ulja visokog kvaliteta, uglavnom inhibirana, kako za upotrebu u novim transformatorima domaćih proizvođača, tako i u transformatorima inostranih proizvođača. Ukoliko se radi o ispitivanju novog ulja već proverenog i poznatog kvaliteta sa kojim se ima pogonsko iskustvo i koje je namenjeno uglavnom za zamenu ostarelog ulja ili za dolevanje ulju transformatora iz pogona, tada se pristupa takozvanom *skraćenom* postupku provere stanja i kvaliteta ulja. Izveštaj instituta tada sadrži pored rezultata ispitivanja i preporuku za njegovu upotrebu. Rezultati ispitivanja stanja i kvaliteta novog ulja se koriste i kao početne vrednosti za praćenje brzine promena karakteristika ulja u toku dalje eksploatacije transformatora.

Jedna od najvažnijih karakteristika novog transformatorskog ulja je *oksidaciona ili hemijska stabilnost ulja*. Rezultati ispitivanja ove karakteristike ulja ukazuju na ponašanje ulja pod pogonskim uslovima za duži period njegove eksploatacije. Stoga je razumljivo da je tom ispitivanju posvećena posebna pažnja od samog početka rada na problematici transformatorskih ulja. (L.7,8). Veštačkim i paralelnim starenjem uzoraka ulja različitih proizvođača, u prvo vreme samo inostranih a kasnije i domaćih, utvrđen je kvalitet velikog broja uzoraka novog ulja veoma različitog stanja i kvaliteta.

Simulirajući što bolje uslove pod kojima ulje stari pri eksploataciji transformatora, ispitivani su uzorci ulja različitog kvaliteta u istim i pooštrenim laboratorijskim uslovima za kraće vreme (ulje se zagreva na 100°C ili 120°C uz protok kiseonika ili vazduha zavisno od metode ispitivanja, uz prisustvo bakarne spirale kao katalizatora). Tako na primer, starenju ulja od 164 h (metoda IEC 74), što se naziva jedna perioda, odgovara približno 7-8 godina starenja ulja pod uobičajenim pogonskim uslovima.

Tabela 1. Rezultati uporednog ispitivanja hemijske stabilnosti ulja prema metodi IEC 74.

Br. Uz	Neutralizacioni broj mg KOH/g ulja								Talog %, težinskim							
	Časovi trajanja ogleđa								Časovi trajanja ogleđa							
	48	96	164	2×164	3×164	4×164	4.5×164	8×164	48	96	164	2×164	3×164	4×164	45×164	8×164
1	-	-	0.00	0.00	0.00	0.00	-	0.00			nema	nema	nema	nema	-	nema
2	-	-	0.00	0.00	0.06	0.18	0.36	4.23			nema	nema	nema	0.006	0.015	1.149
3	-	-	0.00	0.25	0.53	0.56	-	-			nema	0.034	0.246	0.260	-	-
4	-	0.02	0.11	0.30	0.40	0.67	-	-		0.002	0.032	0.091	0.230	0.411	-	-
5	-	-	0.26	0.35	0.51	0.56	-	-			0.058	0.175	0.304	0.384	-	-
6	-	-	0.11	0.16	0.22	0.24	-	-			0.038	0.064	0.096	0.110	-	-
7	0.07	0.10	0.11	0.12	0.12	0.13	-	-	0.013	0.022	0.057	0.091	0.114	0.160	-	-
8	0.11	0.15	0.15	0.15	0.15	0.26	-	-	0.015	0.019	0.040	0.064	0.088	0.114	-	-
9	-	-	0.18	/	0.22	0.23	-	-			0.050	/	0.071	0.087	-	-
10	-	-	0.12	0.21	0.22	0.22	-	-			0.046	0.089	0.133	0.155	-	-

Tabela 2 Rezultati uporednog ispitivanja hemijske stabilnosti ulja prema metodi IEC-474

broj uzorka	Ind. period	Kiselost ulja mgKOH/g ulja									Talog % težinski		
		Isparljiva			Rastvorljiva			Ukupna					
	časovi	i.p	24 h	48 h	i.p.	24 h	48 h	i.p.	24 h	48 h	i.p.	24 h	48 h
1	190-200	0,28	-	-	0,00	-	-	0,28	-	-	nema	-	-
2	69-72	0,28	3,41	8,12	0,69	7,50	8,53	0,97	10,911	16,65	0,032	2,875	4,020
3	26-28	0,28	1,11	1,55	0,26	1,13	1,31	0,54	2,24	2,86	0,018	0,289	0,445
4	36-39	0,28	0,66	1,33	0,40	0,81	0,86	0,68	1,47	1,89	0,085	0,218	0,433
5	9-10	0,28	0,67	0,95	0,38	0,78	0,87	0,66	1,45	1,82	0,054	0,240	0,418
6	6-6	0,28	0,54	0,85	0,23	0,38	0,53	0,51	0,92	1,38	0,037	0,144	0,292
7	8-9	0,28	0,65	1,68	0,33	0,53	1,25	0,61	1,18	2,93	0,022	0,094	0,424
8	8-9	0,28	0,47	0,77	0,28	0,51	0,56	0,56	0,98	1,33	0,036	0,163	0,186
9	6-7	0,28	0,61	0,83	0,24	0,44	0,46	0,52	1,05	1,29	0,054	0,123	0,141
10	11-12	0,28	0,52	0,67	0,17	0,28	0,35	0,45	0,80	1,02	0,063	0,192	0,280

U tabelama 1 i 2 su prikazani rezultati uporednog ispitivanja oksidacione stabilnosti 10 uzoraka novih ulja različitih proizvođača, različitog tipa i kvaliteta obeleženi brojevima od 1-4 inhibirana ulja a od 5-10 neinhibirana. Uporedo u istim ispitnim uslovima, ispitivanja su izvršena prema tada važećim metodama, IEC 74 za nova neinhibirana ulja i IEC 474 za nova inhibirana ulja. Analizom rezultata ispitivanja prikazanih tabelarno zapaža se da uglavnom sva neinhibirana ulja odmah počnu da stare i da se već posle 48-96 sati veštačkog starenja dobijaju merljive vrednosti i za talog i za neutralizacioni broj. Ako su ulja dobrog kvaliteta (uzorci pod brojevima 6, 8 i 9) dalje starenje ulja je sporo i postepeno za razliku od ostalih koja brže stare naročito posle 3-4 periode. Karakterističan je slučaj ulja broj 5 koji posle starenja od 1 periode (tabela 1) zadovoljava kriterijume kvaliteta definisane za neinhibirana ulja ali posle produžetka starenja od 2, 3 i 4 periode ulje veoma brzo stari pa smatramo da nema dobru oksidacionu stabilnost. Inhibirana ulja pod brojevima 3 i 4 zadovoljavaju kriterijume kvaliteta za starenje od 1 periode, ali produženjem starenja od 2, 3 a naročito 4 periode ona brzo stare. Karakterističan je slučaj ulja pod brojem 2 koje zadovoljava kriterijume kvaliteta i posle 4 periode starenja. Međutim, produžetkom starenja za samo još jednu periodu, karakteristike ovog ulja se naglo pogoršavaju. Za razliku od njega, inhibirano ulje broj 1 zadržava dobre osobine i posle produžetka starenja od 5 pa čak i 8 perioda. Slično ponašanje uzoraka ulja se zapaža i kod rezultata ispitivanja po metodi IEC 474 (tabela 2) gde vidimo da vrednost induktionog perioda ili vreme utroška inhibitora, kod inhibiranih ulja, prati vrednosti i gornje zaključke, dok kod neinhibiranih ulja ispitivanje oksidacione stabilnosti po ovoj metodi nema smisla. Kasnije, kada je razvijena jedinstvena metoda za ispitivanje oksidacione stabilnosti i inhibiranih i neionhibiranih ulja, IEC 813/1985 a zatim i sveobuhvatna metoda IEC 61125/1992 ispitivanja oksidacione stabilnosti su vršana i u drugim laboratorijama uporedo sa našom. (L,9,10,11).

Rezultati međulaboratorijskih ispitivanja oksidacione stabilnosti na istim uzorcima ulja su naročito bila od velikog značaja za rad Jugoslovenske komisije na izradi domaćih standarda iz ove oblasti, nacionalni komitet KSN 10. Rezultati ovih ispitivanja su korišćeni i za procenu kvaliteta ulja domaćih proizvođača. Domaći proizvođači ulja Rafinerije nafte "Novi Sad" i "Modriča" su prve uzorke laboratorijski proizvedenog novog ulja i prve industrijski proizvedene šarže domaćeg ulja ispitivali u našoj laboratoriji i uz našu saradnju uspeli da proizvedu novo transformatorsko ulje zadovoljavajućeg kvaliteta. Njihovo ulje se i danas nalazi u eksploataciji u brojnim transformatorima proizvodnje "MINEL" i posle preko 20 godina eksploatacije je i dalje u I grupi kvaliteta. Starenje ovako ispitanih novih ulja pod realnim pogonskim uslovima je praćeno dugi niz godina u okviru redovne, periodične kontrole stanja i stepena ostarelosti ulja transformatora iz eksploatacije. Zaključci o kvalitetu ulja doneseni na osnovu laboratorijskog ispitivanja oksidacione stabilnosti ulja su uglavnom potvrđeni u praksi pa se na vreme, pre nego dođe do izdvajanja produkata starenja ulja kao nerastvornog taloga, moglo intervenisati ili zamenom ostarelog ulja novim uljem ili regeneracijom ulja adsorbentima i inhibiranjem. Na taj način su stečena dragocena iskustva neophodna za procenu brzine starenja novog tipa ulja sa kojim se nema pogonskog iskustva. Rezultati ispitivanja oksidacione stabilnosti ulja i iskustva stečena u proteklih 36 godina ispitivanjem velikog broja uzoraka novih ulja različitih proizvođača i kvaliteta i više hiljada uzoraka tih istih ulja iz eksploatacije, omogućavaju nam da sa velikom dozom sigurnosti utvrdimo kvalitet novog transformatorskog ulja koje se nudi na domaćem tržištu ulja, stanje a približno i budući radni vek ulja transformatora iz pogona. To nam je pomoglo da se "odbranim", devedesetih godina u vreme ekonomske blokade naše zemlje, od ponuda za nabavku i upotrebu ulja

nezadovoljavajućeg kvaliteta, obično nepoznatog proizvođača i bez prateće dokumentacije.

Pored napred navedenog, posebna pažnja prilikom ispitivanja kvaliteta novih transformatorskih ulja je posvećena ispitivanju kvaliteta ulja parafinske baze. To je naročito postalo aktuelno i važno kada je domaća Rafinerija "Modriča" počela proizvodnju ulja tip "Trafomol-specijal" iz parafinske nafte. Ulje je prošlo detaljno ispitivanje kako u našoj laboratoriji tako i u laboratorijama Instituta iz Zagreba i Ljubljane, rezultati su razmatrani u okviru radne grupe za standarde, KSN, pre nego je dobilo dozvolu za upotrebu u transformatorima domaćih proizvođača. U tabeli br. 3 su prikazani rezultati ispitivanja uzoraka ulja tip "Trafomol-specijal" iz transformatora proizvodnje "MINEL" i "Rade Končar" uzeti pre uključanja transformatora ili u prvoj godini rada i posle 4-5 godina pogona. Nisu zapažene veće promene karakteristika ulja nego što su kod ulja naftenske baze (uzorci broj 13 i 14). Tabela pokazuje i da rezultati ispitivanja fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ovog ulja nisu lošiji od ulja naftenske baze. Od ovoga se izuzimaju rezultati ispitivanja oksidacione stabilnosti ulja koji nisu od značaja jer se radi o inhibiranom ulju kod koga se merljive promene ove karakteristike ulja javljaju uglavnom posle više godina eksploatacije transformatora pod pogonskim uslovima.

Na osnovu rezultata našeg uporednog ispitivanja ulja naftenske i parafinske baze (L.12) i rezultata ispitivanja brojnih inostranih laboratorijama prezentovanih u stručnoj tehničkoj literaturi (L.13,14,15,16) može se zaključiti da kvalitet parafinskih ulja kao i naftenskih prvenstveno zavisi od stepena rafinisanosti ulja odnosno od optimalnog sadržaja aromatskih ugljovodonika koji su zajednički za oba tipa ulja. U zavisnosti kakvo se ulje želi dobiti pravi se kompromis između oksidacione stabilnosti ulja i njegovih gas-adsorpcionih karakteristika. Ulja koja imaju manji sadržaj aromata (od 4-10%) manje adsorbuju 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 parafinskih i naftenskih ugljovodonika. Inostrana ispitivanja su pokazala da nisu zapažene razlike u dielektričnim svojstvima papira impregnisanog parafinskim odnosno naftenskim uljem ili njihovom mešavinom. Na osnovu rezultata ispitivanja velikog broja mernih transformatora sa naftenskim i parafinskim uljem koji su bili izloženi ubrzanom starenju pod naponom 1,85 puta većim od njihovog nazivnog napona, u trajanju od 1650 časova, što odgovara preko 25 godina rada pod normalnim pogonskim uslovima, nisu zapažene nikakve promene električnih karakteristika transformatora (gubici ili parcijalna pražnjenja). Kada su na kraju perioda starenja ispitani uzorci ulja utvrđeno je da nije bilo nikakvih modifikacija niskotemperaturnih karakteristika parafinskih ulja, odnosno nije se promenila njihova tačka tečenja i viskoznost. Slični zaključci su izvedeni i u okviru radne grupe IEC-a koja se bavila detaljnim ispitivanjem uticaja više vrsta depresanata na karakteristike ulja i eventualnu pojavu neželjenih sporednih efekata kod ulja parafinske baze (L.17).

Tabela 3. Rezultati ispitivanja ulja "TRAFOMOL SPECIJAL" iz eksploatacije transformatora "MINEL" i "R. KONČAR

R. Br.	Trafo-stanica, Proiz. trans	Fabrički broj	Ispitano godine	Diel. čvrst. (kV/cm)	tgδ (%)	Spec.el. otpor (G.Ω.M)	Tačka paljenja (°C)	Neutr.br. (mgKOH/g)	Površ.napon (mN/m)	Indukcioni period (h)
0	ново ulje 1988			245	3,30	57,0	180	0,01	37,46	168
1	Šabac 2 "	09821757 "	1984 1988	245 245	3,45 1,88	57,0 57,0	190 189	0,03 0,02	36,23 33,57	170 -
2	Šabac 2 "	09821758 "	1984 1988	245 245	5,02 2,61	57,0 57,0	193 188	0,02 0,02	37,14 33,29	172 95-100
3	Majdanpek "	09821763 "	1983 1988	245 245	2,53 5,97	39,5 57,0	185 186	0,01 0,03	39,20 31,00	115 76-80
4	Majdanpek "	09821764 "	1983 1988	240 165	2,19 4,08	39,5 57,0	185 183	0,01 0,03	38,20 35,16	113 -
5	Negotin (Bor) "	09821744 "	1984 1988	245 245	2,51 13,04	57,0 57,0	184 176	0,01 0,02	37,92 38,92	172 120
6	Kozle "	09821727 "	1984 1988	227 -	4,08 6,13	57,0 57,0	187 182	0,02 0,03	34,95 32,29	172 70-80
7	Kozle	09821726	1988	-	5,03	57,0	155	0,01	35,84	67-75
8	Đorđe Petrov "	09821742 "	1984 1988	120 -	7,53 6,44	35,6 57,0	183 180	0,02 0,03	36,21 34,52	170 110-120
9	Aerodr.	09821743	1988	-	2,20	57,0	189	0,03	33,77	110-120
10	Istok	09821721	1988	-	5,80	57,0	156	0,02	35,69	67-75
11	Rade Končar (1983)	513172	1988	-	21,44	28,5	177	0,04	25,86	-
12	Rade Končar	513173	1988	-	16,65	40,7	180	0,04	31,17	95-120

R. Br.	Trafo-stanica, Proiz. trans	Fabrički broj	Ispitano godine	Diel. čvrst. (kV/cm)	tgδ (‰)	Spec.el. otpor (G.Ω.M)	Tačka paljenja (°C)	Neutr.br. (mgKOH/g)	Površ.napon (mN/m)	Indukcioni period (h)
13	Zrenjanin	09781435	1979	130	4,75	61,7	140	0,00	32,24	38
	"	"	1983	245	11,62	22,8	148	0,01	33,23	-
	"	"	1988	245	8,95	57,0	150	0,03	30,86	-
14	Kraljevo 3	337035	1982	240	2,07	452,0	150	0,02	39,9	72
	"	"	1986	245	4,55	57,0	155	0,02	36,6	-

VIII.3. TRANSFORMATORSKA ULJA IZ POGONA

Najveći broj uzoraka ulja čije se karakteristike ispituju u hemijskoj laboratoriji instituta su uzorci ulja transformatora iz eksploatacije koji se redovno ispituju u okviru preventivne, periodične kontrole stanja i kvaliteta ulja iz eksploatacije. To su prvenstveno ulja energetskih transformatora iz prenosne visokonaponske mreže, 110 kV i iznad ali i ulja iz 35kV mreže, zatim ulja transformatora hidro i termo elektrana (blok transformatori, regulacioni, kućni) kao i transformatora iz energetskih postrojenja brojnih industrijskih organizacija (željezare, cementare, aluminijumski kombinati i sl.). Metode ispitivanja kao i kriterijumi za procenu stanja i kvaliteta ulja transformatora iz eksploatacije su definisani u standardu JUS/IEC 60422/1994 god. "Uputstvo za nadzor i održavanje mineralnih izolacionih ulja u električnoj opremi".

Na fizičke, hemijske i električne karakteristike ulja transformatora iz pogona utiču, pored kvaliteta samog ulja, niz faktora koji menjaju vrednosti pojedinih karakteristika što jednim imenom nazivamo radni uslovi eksploatacije ulja transformatora u pogonu. To su spoljašnji uticaji (atmosferska vlaga i kiseonik iz vazduha), nečistoće zaostale u transformatoru ili nastale usled prisutnog kvara (gasovi, čestice uglja, metala, vlakanca celuloze i dr.), radna temperatura ulja i namotaja, električna polja i pojave u vezi sa njima (parcijalna pražnjenja, električni luk), katalitičko dejstvo konstrukcionih metala (bakar, gvožđe, aluminijum) i dr. Pod uobičajenim pogonskim uslovima većina karakteristika ulja se postepeno menja, ulja postepeno i normalno stare i njihov radni vek se poklapa sa radnim vekom samog transformatora a to je oko i preko 40 godina neprekidnog pogona što je potvrdila i naša dugogodišnja praksa. Ukoliko dođe do nagle promene jedne ili obično više karakteristika ulja to je ili usled lošeg kvaliteta upotrebljenog ulja pa ulje ubrzano stari ili je došlo do pojačanog uticaja jednog ili više pogonskih faktora. Redovnim i periodičnim ispitivanjem uzoraka ulja utvrđuje se brzina promene jedne ili više karakteristika ulja i procenjuje, bar približno, brzina njihove buduće promene odnosno procenjuje se budući radni vek ulja. To je veoma korisno znati da bi se planirala potrebna intervencija na ulju transformatora u vreme koje najviše odgovara korisniku transformatora a to je obično u vreme remonta ili prilikom isključenja transformatora radi kvara.

Na osnovu rezultata ispitivanja karakteristika ulja i postojećih kriterijuma za njihovu procenu ulja se razvrstavaju u jednu od sledeće 4 grupe kvaliteta:

- Ulje razvrstano u prvu grupu kvaliteta je u dobrom pogonskom stanju. Ulje je i dalje novo ili umereno ostarelo sa visokom vrednošću dielektrične čvrstoće i malim sadržajem vlage. Sledeće ispitivanje uzorka ulja u okviru redovne periodične kontrole treba izvršiti kroz 4 godine pogona.
- Ulje razvrstano u drugu grupu kvaliteta je kao i prethodno novo ili umereno ostarelo ali je vlažno sa niskom i nezadovoljavajućom dielektričnom čvrstoćom, visokim sadržajem vode i kao takvo neupotrebljivo u postojećem stanju. Posle dobrog sušenja i ulja i celulozne izolacije (na licu mesta ili u fabrici ili u remontnoj radionici), ulje se razvrstava u prvu grupu kvaliteta i dalje tretira kao ostala ulja I grupe.
- Ulje razvrstano u treću grupu kvaliteta je znatno ostarelo pod pogonskim uslovima ali vrednosti većine ispitanih karakteristika ulja su iznad (ili ispod zavisi od karakteristike koja se ispituje) graničnih vrednosti. Ulje je i dalje upotrebljivo sve dok ima zadovoljavajuću dielektričnu čvrstoću i mali sadržaj vode ali treba računati na potrebu, u dogledno vreme, njegove zamene novim uljem ili

regeneracije adsorbentima i inhibiranjem. Sledeća kontrola ulja se vrši kroz 1-2 godine pogona transformatora.

- Ulje razvrstano u četvrtu grupu kvaliteta je veoma i vlažno i ostarelo pa ne zadovoljava u postojećem stanju za dalju upotrebu. Obično se predlaže njegova zamena novim uljem uz dobro sušenje i ispiranje aktivnog dela transformatora i samog transformatorskog suda.

Učestalost uzimanja i ispitivanja uzoraka ulja u okviru preventivne, periodične kontrole pored toga što zavisi od grupe kvaliteta kojoj ulje pripada, zavisi i od veličine i značaja transformatora za elektroenergetski sistem. Veće i skuplje transformatore kao i transformatore koji zauzimaju posebno važno mesto u sistemu svake zemlje, kao što su blok transformatori, pećni i sl. treba češće kontrolisati. Tu dolazi do izražaja specifičnost problematike kontrole transformatora u našoj zemlji kao i naše dugogodišnje iskustvo. Da bi ispitivanje uzoraka ulja transformatora iz eksploatacije bilo korektno, veoma je važno, kao i kod novih ulja, pravilno uzeti uzorak ulja koji treba da reprezentuje ukupno stanje ulja u transformatoru. Uzorci ulja se obično uzimaju iz donjeg nivoa transformatorskog suda dok je transformator u radu, pomoću čiste i suve opreme instituta koja zaštićuje uzorak od spoljašnjeg zagađenja, pri radnoj temperaturi ulja a zatim ispituju u laboratoriji ohlađeni na sobnu temperaturu.

Ilustracije radi u tabeli br. 4 su prikazani rezultati ispitivanja uzoraka ulja 10 transformatora iz pogona, inhibiranih i neinhbiranih, različitih proizvođača, uslova i godina eksploatacije. Kao što se vidi iz tabele, skoro da nema energetskog transformatora iz eksploatacije čije ulje ima nezadovoljavajuću vrednost dielektrične čvrstoće. Ukoliko je transformator kao nov napunjen sa uljem dobrog kvaliteta, bez obzira da li je neinhbirano (br. 2,4 i 6) ili inhibirano (br.3,7) ono taj kvalitet zadržava duži niz godina sa tom razlikom što se kod neinhbiranih ulja karakteristike ulja počinju postepeno pogoršavati već od prve godine pogona. Kod inhibiranih ulja karakteristike ulja se neznatno menjaju sve dok je prisutan aktivan inhibitor koji za sebe vezuje produkte starenja ulja.

U hemijskoj laboratoriji instituta je razrađena metoda za poboljšanje stanja i kvaliteta ostarelih ulja iz eksploatacije hemijskom obradom adsorbentima i inhibiranjem. Pomoću pokretnog uređaja za regeneraciju i inhibiranje ulja tip VH-312 proizvodnje "Micafil", i domaćeg adsorpcionog materijala nađenog uz saradnju stručnjaka Rudarsko - Geološkog Fakulteta iz Beograda, (L.18), "Elektroistok" je u proteklom periodu obradio ostarela ulja velikog broja energetskih transformatora. Rezultati laboratorijskih istraživanja velikog broja uzoraka adsorbenata domaćeg i stranog porekla kao i rezultati ispitivanja obrađenog ulja u pogonskim uslovima, sve u okviru studije (L.6) kao i rezultati dobijeni praćenjem ponašanja obrađenih ulja u pogonskim uslovima duži niz godina, su objavljeni u stručnim časopisima i brojnim skupovima energetičara u zemlji i inostranstvu (L.19,20,21,22,23). Regeneracija ulja adsorbentima i inhibiranjem se vrši na licu mesta, u trafo stanici, čime se postiže ušteda u transportnim troškovima koji su znatni naročito kod velikih transformatora. Posle skoro 20 godina primene ovog postupka i redovne preventivne, periodične kontrole stanja i kvaliteta obrađenih ulja, ulja većine ovih transformatora su još uvek u prvoj grupi kvaliteta.

U tabeli br. 5 su prikazani rezultati ispitivanja 10 uzoraka ulja uzetih iz transformatora pre obrade, prvi red u tabeli, posle obrade u pogonskim uslovima uz upotrebu domaćeg adsorbenta a zatim posle više godina eksploatacije transformatora. Od ukupnog broja transformatora (preko 100) sa obrađenim uljem, ilustracije radi, odabrani su transformatori različitih proizvođača, sa uljima različitog porekla i kvaliteta, godina i uslova eksploatacije.

Tabela 4. 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	1985	III
	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	"	0,03	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

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.
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

Tabela 5. Rezultati ispitivanja uzoraka ulja transformatora iz pogona pre i posle obrade

Red. br.	Godina ispitivanja	Karakteristike ulja						Grupa kvaliteta
		Dielek. čvrst. kV/cm	tgδ 90°C x10 ⁻³	Spec.el. otp. 90°C GΩm	Međ.povr. napon mN/m	Neut.br. mgKOH/g ulja	Talog sa n-heptanom	
1.	1985pr	150	68,1	3,1	17,09	0,28	ima	III
	1986	103	12,7	28,5	27,86	0,07	nema	II
	1989	>250	20,1	14,3	26,97	0,08	nema	I
	1997	199	29,6	-	24,72	0,20	nema	I
2.	1983pr	>245	118,4	1,6	19,43	0,20	ima	III
	1985	>245	28,9	9,5	28,72	0,06	nema	I
	1990	>250	41,4	6,2	22,85	0,14	nema	I
	1996	>250	70,7	3,5	27,78	0,16	nema	I
3.	1987pr	>245	50,5	4,8	18,02	0,19	ima	III
	1988	228	13,8	28,5	31,69	0,06	nema	I
	1991	>250	16,4	14,8	27,33	0,04	nema	I
	1998	>250	25,6	11,6	23,16	0,06	nema	I

Red. br.	Godina ispitivanja	Karakteristike ulja						Grupa kvaliteta
		Dielek. čvrst. kV/cm	tgδ 90°C x10 ⁻³	Spec.el. otp. 90°C GΩm	Međ.povr. napon mN/m	Neut.br. mgKOH/g ulja	Talog sa n-heptanom	
4.	1987pr	>245	96,3	2,7	21,09	0,17	...	III
	1989	>250	9,5	35,6	27,96	0,04	nema	I
	1996	>250	6,4	18,0	30,08	0,08	nema	I
5.	1986pr	-	33,9	7,3	19,48	0,11	...	III
	1986	>245	5,4	57,0	33,50	0,02	nema	I
	1991	245	12,3	22,0	24,16	0,08	nema	I
	1996	>250	10,0	35,6	33,70	0,05	nema	I
6.	1986pr	-	58,8	3,7	20,56	0,11	...	III
	1987	226	25,1	9,5	27,06	0,06	nema	I
	1991	>250	30,0	7,6	29,21	0,10	nema	I
	1996	>250	31,5	7,1	28,88	0,07	nema	I
7.	1989pr	>250	156,6	1,3	16,58	0,28	ima	III
	1990	>250	12,7	32,0	3,85	0,03	nema	I
	1995	215	21,6	10,9	33,63	0,04	nema	I
8.	1989pr	>250	20,3	11,4	16,22	0,35	ima	III
	1990	>250	5,4	50,4	31,65	0,03	nema	I
	1995	152	8,6	21,1	28,59	0,07	nema	I
9.	1987pr	220	68,3	2,9	19,33	0,12	ima	III
	1987	>250	16,2	35,6	35,22	0,02	nema	I
	1998	>250	15,1	21,9	24,75	0,03	nema	I
10.	1989pr	>250	77,6	2,4	16,12	0,22	ima	III
	1992	>250	18,4	20,3	30,42	0,07	nema	I
	1996	>250	24,0	13,2	26,32	0,05	nema	I

Transformatori red.br.1,5,6,7 su domaće proizvodnje, br.3,9,10 proizvođača istočnoevropskih zemalja a ostali proizvođača zapadnoevropskih zemalja. Napomena: sva ulja su pre obrade imala visoku vrednost dielektrične čvrstoće ulja pa je obrada ulja adsorbentima i inhibiranjem preduzeta samo zbog ostarelosti. Kod transformatora br.4 je obrada ulja rađena u toku opravke transformatora posle kvara.

U poslednje vreme postaje aktuelna hemijska obrada ulja rerafinacijom i inhibiranjem, obično kod ulja četvrte grupe kvaliteta koja su toliko ostarela da se njihov kvalitet ne može popraviti prethodnim postupkom. Postupak rerafinacije korišćenih transformatorskih ulja podrazumeva duboku rafinaciju otpadnog, više neupotrebljivog ulja i dobijanje ulja sa karakteristikama novog ulja. Ovaj postupak obrade ulja ima velike ekološke prednosti za očuvanje životne sredine. Smanjuje se količina otpadnog ulja i izbegava aero zagađenje usled štetne emisije gasova koji nastaju sagorevanjem otpadnih ulja (L.24).

VIII.4. MEŠANJE TRANSFORMATORSKIH ULJA

U praksi se često susreće potreba međusobnog mešanja transformatorskih ulja što se takođe rešava u hemijskoj laboratoriji instituta. To je obično u slučajevima potrebe doleivanja novog ulja ulju transformatora iz pogona ili prilikom remonta transformatora ili u rešavanju problema uskladištenja ulja različitih proizvođača i kvaliteta u elektroenergetskim postrojenjima. Pitanje međusobnog mešanja transformatorskih ulja je postalo aktuelno naročito sa pojavom domaćih proizvođača inhibiranih i neinhibiranih ulja, naftenske ili parafinske baze sa kojim se nije imalo pogonskog iskustva pa je od prvih proizvodnih šarži pristupljeno detaljnom ispitivanju ne samo njihovog kvaliteta već i mogućnosti međusobnog mešanja i mešanja sa uljima inostranih proizvođača. Posle velikog broja rezultata laboratorijskog ispitivanja uzoraka mešavina novih ulja, novih sa uzorcima ulja iz eksploatacije, njihovog uporednog veštačkog starenja a zatim praćenja promena karakteristika mešavina ulja u eksploataciji, utvrđena su pravila o mešanju transformatorskih ulja.

U tabeli br. 6 su prikazani rezultati ispitivanja novog ulja domaće proizvodnje A i njegove mešavine sa uzorcima dva ulja iz pogona, M i N, različitog stanja i kvaliteta. Na osnovu prikazanih rezultata može se zaključiti da se novo ulje A može koristiti za doleivanje uljima iz eksploatacije M i N. Sve bitne karakteristike njihovih mešavina imaju bolje vrednosti od istih kod pojedinačnih ulja iz eksploatacije, računajući i njihovu hemijsku stabilnost. Količine taloga mešavina izmerene posle veštačkog starenja ukazuju da pod pogonskim uslovima neće doći do izdvajanja taloga iz mešavina ulja.

Na osnovu iskustva iznetog u stručnoj tehničkoj literaturi, rezultata ispitivanja mešavina ulja i dugogodišnjeg iskustva sa praćenjem promena karakteristika ulja i njihovih mešavina transformatora iz pogona, postavljena su pravila o mešanju transformatorskih ulja (L.1, 25). U njima je definisano kad i koja nova ulja mogu međusobno da se mešaju kao i ulja iz eksploatacije, zatim međusobno nova ulja i ulja iz eksploatacije a prikazana su i neka opšta pravila kada nije dozvoljeno međusobno mešanje transformatorskih ulja.

Tabela 6. Rezultati ispitivanja novog ulja, ulja iz eksploatacije i njihovih mešavina

Red. Br.	Karakteristike ulja	Oznaka uzorka				
		A	M	N	AM	AN
1.	Gustina na 20°C	0,845	0,889	0,873	0,867	0,859
2.	Viskoznost na 20°C (mm ² /s)	27,08	23,35	30,40	24,79	27,04
3.	Viskoznost na -30°C (mm ² /s)	897,6	1149,23	3823,4	913,5	873,8
4.	Tačka paljenja (°C)	196	146	158	151	164
5.	Tačka stinjanja (°C)	-34	-57	-38	-45	-41
6.	Indeks prelamanja na 20°C	1,4718	1,4925	1,4822	1,4831	1,4779
7.	Neutr. broj (mgKOH/g ulja)	0,01	0,10	0,05	0,06	0,03
8.	Međupovršinski napon (mN/m)	42	23	27	28	30
9.	Dielektrična čvrstoća (kV/cm)	>245	226	>245	>245	>245
10.	tgδ 90°C (%)	0,84	49,63	38,95	30,15	18,22
11.	Spec.el.otpor (Ohm x cm x 10 ¹²)	5,71	0,52	0,55	0,89	1,07
	Sadržaj inhibitora	ima	ima	nema	ima	ima
12.	Hemijska stab. IEC-422 (h)	155	12	-	44	38
13.	Hemijska stab. IEC-74 (164h)					
	Neutr. broj (mgKOH/g ulja)	0,00	0,35	0,76	0,16	0,15
	Talog (% maseni)	Nema	0,037	0,176	0,006	0,022
	tgδ 90°C (%)	5,34	148,41	412,49	27,96	58,17
14.	Spec.el.otpor (Ohm x cm x 10 ¹²)	2,76	0,12	0,043	0,95	0,59
	(Međupovršinski napon (mN/m))	21	20	6	24	26

VIII.5. ISPITIVANJE ULJA INFRACRVENOM SPEKTROFOTOMETRIJOM, IR

Infracrvena spektrofotometrija spada u grupu instrumentalnih analiza koja već duže vreme ima široku primenu u mnogim oblastima hemijskog istraživanja. U okviru studije (L.5) iz 1980 god. Snimljeni su spektri 27 uzoraka novih transformatorskih ulja, inhibiranih i neinhbiranih, različitih proizvođača i kvaliteta, zatim spektri 32 uzorka ulja transformatora iz eksploatacije takođe različitog stanja i kvaliteta kao i spektri uzoraka ulja veštački ostarelih u laboratorijskim uslovima u okviru ispitivanja njihove oksidacione stabilnosti.

Apsorpcioni IR spektar transformatorskog ulja je veoma složen ali ima karakteristične apsorpcione trake pogodne za analitičke svrhe. To je na prvom mestu apsorpciona traka inhibitora oksidacije, 2,6 DBPC, (ditercijerni-butil-para-krezol) koja se koristi za njegovo kvalitativno i kvantitativno određivanje po metodi IEC 60666/1979 god. Metoda se sastoji u merenju apsorpcije OH grupe na talasnoj dužini od 3650 cm⁻¹. Za određivanje sadržaja aromatskih ugljovodonika u novom transformatorskom ulju, od kojih najviše zavisi kvalitet ulja, koristi se apsorpciona traka talasnog broja 1605 cm⁻¹. Metoda je standardizovana u JUS/IEC 60590/1977 god. U oblasti talasnih brojeva od 1800-1650 cm⁻¹ dobija se jedna široka apsorpciona traka vibracije karbonilne grupe C=O, proizvoda oksidacije transformatorskog ulja čija je veličina relativna mera ostarelosti ulja. Ova oblast se koristi kao pokazatelj, uz ostale pokazatelje, ostarelosti ulja iz eksploatacije ali na njenu veličinu mogu uticati i razni u ulju rastvoreni zagađivači koji takođe imaju karbonilnu grupu. Stoga je IR ispitivanje samo orijentaciono pokazatelj ostarelosti ulja koju treba utvrditi na osnovu ispitivanja fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja pre nego se donese odluka o daljoj upotrebljivosti ulja kod transformatora iz pogona.

VIII.6. SARADNJA IZ OBLASTI TRANSFORMATORSKIH ULJA

Pored redovne, preventivne i periodične kontrole stanja i kvaliteta ulja transformatora u eksploataciji i velikog sopstvenog iskustva stečenog dugogodišnjim radom, za što bolje praktično korišćenje rezultata ispitivanja uzoraka ulja, od posebnog značaja je saradnja sa stručnjacima kako domaćim tako i stranim hemijske i elektrotehničke struke. Od prvog dana laboratorija Instituta „Nikola Tesla“ ima veoma razvijenu saradnju sa stručnjacima iz elektroenergetskih pogona čiji se transformatori redovno godinama ispituju. Kako je jedna od osnovnih delatnosti laboratorije provera kvaliteta novih transformatorskih ulja, to je uslovalo da od prvog dana rada laboratorija razvije veoma intenzivnu saradnju sa laboratorijama domaćih proizvođača transformatorskih ulja kao što su Rafinerije nafte „Novi Sad“ i „Modriča“. Od inostranih proizvođača ulja posebno je istaknuta korisna dugogodišnja saradnja sa laboratorijom „TECHNOL“ iz Austrije čije se ulje tip Y-3000 nalazi u velikom broju domaćih transformatora u eksploataciji. U većini transformatora to ulje je i posle dugogodišnje eksploatacije (preko 35 i 40 godina) i dalje dobrog stanja i kvaliteta i služilo je kao reper za procenu kvaliteta novih ulja ostalih stranih i domaćih proizvođača prilikom ispitivanja njihove oksidacione stabilnosti.

Saradnja sa domaćim i stranim proizvođačima transformatora se pokazala naročito korisnom i neophodnom u postavljanju dijagnoze o ispravnosti transformatora kao i prilikom utvrđivanja vrste, obima, lokacije kvara i potrebne intervencije na licu mesta ili u fabrici kod neispravnih transformatora. Zadnjih godina uglavnom sarađujemo sa fabrikom transformatora „MINEL“ iz Ripnja i remontnom radionicom „MINEL-DINAMO“. U laboratoriji se ispituje kvalitet novih ulja pre upotrebe u novim i remontovanim transformatorima, zatim se ispituje sadržaj vode u toku same obrade ulja sušenjem i filtriranjem i po završetku svih radova što omogućava da se utvrdi efikasnost obrade ulja a preko ulja i čvrste izolacije transformatora.

VIII.7. ZAKLJUČAK I SMERNICE ZA DALJI RAD

Redovnom kontrolom stanja i kvaliteta ulja transformatora u laboratoriji Instituta „Nikola Tesla“, postignuto je da transformatori u eksploataciji, naročito u energetske viših naponskih nivoa, 110 kV i iznad, praktično nemaju ulje nezadovoljavajućeg stanja i kvaliteta iako je većina njih u neprekidnom pogonu preko 20-40 godina. U novim transformatorima nalivena su ulja samo visokog kvaliteta, inhibirana, pa su u većini slučajeva i danas u I grupi kvaliteta. Sa druge strane, zahvaljujući redovnoj, preventivnoj i periodičnoj kontroli uzoraka ulja transformatora iz eksploatacije, kod većine transformatora je ostarelo ulje zamenjeno novim uljem ili mu je radni vek produžen za 15-20 godina regeneracijom adsorbentima i inhibiranjem.

Uzimajući u obzir poodmaklu ostarelost izolacionog sistema većine transformatora u našim pogonima i neophodnost njihove revitalizacije u dogleđno vreme, smatramo da treba nastaviti sa praćenjem promena karakteristika ulja istom učestanošću ispitivanja uzoraka ulja koja se, na osnovu postojećeg iskustva, pokazala zadovoljavajućom. Koristeći opremu uslužnih laboratorija danas je program ispitivanja uzoraka kako novih ulja tako i ulja iz eksploatacije, proširen ispitivanjem čestica u ulju, uzoraka celulozne izolacije impregnisanе uljem, sadržaja policikličnih aromata i dr. Metode za ova ispitivanja su već standardizovane u okviru IEC-a a neke od njih i propisane standardom IEC za nova izolaciona ulja.

Laboratorija u narednom periodu planira da nastavi primenu novih metoda ispitivanja izolacionog sistema papir-ulje, sa posebnim naglaskom na ispitivanja i

istraživanja u oblasti analize čvrste izolacije transformatora određivanjem stepena polimerizacije papira - Dpvsr. i analizu derivata jedinjenja furana rastvorenih u ulju

U proteklih nekoliko godina se vrši prema potrebi i zahtevu korisnika. Tendencija je da se analiza furana uvede u periodičnu kontrolu, zajedno sa gasnohromatografskom analizom ulja. Ovakav koncept održavanja transformatora analizom ulja prisutan je kod svih laboratorija članica IEC TC 10, pri čemu su preporuke vodećih eksperata iz oblasti transformatorskih ulja da se analiza furana vrši zajedno sa GH analizom ulja, kao kombinovani dijagnostički alat za procenu pogonske ispravnosti transformatora, što potvrđuju i navodi iz stručne literature (27).

Budući rad hemijske laboratorije instituta treba proširiti na periodičnu kontrolu drugih ulja kao što su turbinska ulja, koja se za sada samo sporadično ispituju, zatim na ispitivanje gasnih dielektrika, sumporheksafluorida, FS6, koji se sve više koristi i susreće u elektroenergetskim pogonima u mernim transformatorima i električnim prekidačima. Svakako i za ova ispitivanja je neophodna odgovarajuća laboratorijska oprema sa kojom, za sada, hemijska laboratorija instituta samo delimično raspolaže..

LITERATURA

- [1] Pejović V. „Hemija u elektroenergetici - Transformatorska ulja“, monografija Instituta „Nikola Tesla“, Beograd, 2005,
- [2] Pejović V., Duduković P. "Promena karakteristika izolacionih ulja u eksploataciji", XI CIGRE, Ohrid, 1972,
- [3] Pejović V., Brkić R., Bojković A., Duduković P. "Izolaciona ulja - Proučavanje čimilaca koji utiču na karakteristike ulja za transformatore i prekidače", studija Instituta "Nikola Tesla" br. 473039, Beograd, 1973,
- [4] Pejović V., Bojković A. "Kontrola transformatora analizom gasova, hromatografska ispitivanja", studija Instituta "Nikola Tesla" br. 477, Beograd, 1977,
- [5] Pejović V., Milivojević J., Đurđević K. "Ispitivanje transformatorskih ulja infracrvenom spektrofotometrijom", studija Instituta "Nikola Tesla", br. 480296, Beograd, 1980,
- [6] Pejović V. "Poboljšanje kvaliteta transformatorskih ulja iz eksploatacije hemijskom obradom". Studija Instituta "Nikola Tesla", Beograd, 1984,
- [7] Pejović V., Duduković P. "O postojanosti prema starenju transformatorskih ulja sa domaćeg tržišta" XII CIGRE, Bled, 1977,
- [8] Duduković P., Pejović V. "On the Testing Methods for Chemical Stability of Transformer Insulating Oils", IEEE, Philadelphia, 1978,
- [9] Knežević D., Pahor K. "Ispitivanje domaćih transformatorskih ulja", XVII CIGRE, Bled, 1985,
- [10] Čabrac S. "Vrednovanje oksidacione stabilnosti izolacionih ulja prema različitim metodama ispitivanja", XIX CIGRE, Bled, 1989,
- [11] Lukić J., Pejović V., Đurđević K., Vesković M. "Nove metode za ispitivanje oksidacione stabilnosti izolacionih ulja", XXIII JUKO-CIGRE, Herceg Novi, 1997,
- [12] Pejović V., "Mešanje izolacionih transformatorskih ulja u teoriji i praksi". XVII CIGRE, Struga, 1985,
- [13] Pejović V. "Inostrana i domaća iskustva sa izolacionim uljima parafinske baze", XIX CIGRE, Bled, 1989,

- [14] Fallou B., Despiney Ph., Perret Y. "Evaluation du comportement d' huiles mine rales isolatens d'originale paraffinique", CIGRE, 1982,
- [15] Rindflesch H.J., Schmidt J. "Essais des huiles Paraffiniques dans des modeles de transformateurs", CIGRE, 1982,
- [16] 10A (Secretariat) 79, "Behaviour of oils containing depressant additives and fulfilling the requirements of IEC publication 296", report W6-05, 1983,
- [17] Langhame Y., Duval M. "Physical Behavior of Paraffinic Oils at Low Temperatures", IEEE tran. El. Ins., 1985,
- [18] Studniarz S.A., Mullen G.A. "Electrical Properties of some Naphtenic and Paraffinic Mineral Oils", IEEE Trans. on Pow. App. and Syst., N o3, 1980, oksidacione stabilnosti izolacionih ulja", XXIII JUKO-CIGRE, Herceg Novi, 1997,
- [19] Prof. Nikolić D. Studija "Proučavanje potencijalnih domaćih mineralnih sirovina kao adsorbenata za hemijsku obradu i inhibiranje transformatorskih ulja", Beograd, 1984
- [20] Pejović V. "Laboratorijska ispitivanja poboljšanja kvaliteta transformatorskih ulja iz eksploatacije pomoću različitih vrsta domaćih i stranih adsorpcionih materijala", XVI CIGRE, Opatija, 1983
- [21] Pejović V. " Ispitivanje domaćih sirovina kao potencijalnih adsorbenasa za obradu transformatorskih ulja", Hem. Ind. 38, 1984
- [22] Pejović V., Bojković A., Bek F., Živanović M. "Reklaming of aged transformer oils on site" International Conference on IPPT, II, Lođ, Poland, 1987
- [23] Pejović V. "Iskustva sa regeneracijom adsorbentima transformatorskih ulja u eksploataciji", XVIII CIGRE, Budva, 1987
- [24] Pejović V. Mitrović G. "Revitalizacija energetskih transformatora iz pogona hemijskom obradom transformatorskog ulja", XXIV CIGRE, Vrnjačka banja, 1999
- [25] Orlović A., Pejović V. "Rerafinacija otpadnih mineralnih transformatorskih ulja", Naučno-stručno savetovanje Energetika Jugoslavije, ENYU, Zlatibor, 1999.
- [26] Pejović V., "Mešanje izolacionih transformatorskih ulja u teoriji i praksi". XVII CIGRE, Struga, 1985,
- [27] Hohlein i saradnici, D1- 309 , CIGRE 2004.

U toku višegodišnjeg istraživanja na ispitivanju transformatorskih ulja učestvovali su sledeći istraživači: Pejović Velinka, Lukić Jelena, Drakić Ksenija, Teslić Slađana, Rajaković Vladana, Milivojević Jovan, Đurđević Ksenija, Kovačević Snežana, Ivančević Vladimir, Bojković Aleksandar, Jovanović Đorđe, Teslić Dragan, Jovanović Dragan, Stojković Marjan, Nešić Dragan.

PREDICTIVE MAINTENANCE OF POWER TRANSFORMERS THROUGH OIL ANALYSIS

Velinka Pejović, Ksenija Drakić, Jelena Lukić

During the past 40 years, laboratory of Institute "Nikola Tesla" is working on periodical prevention control of high voltage equipment and other measuring devices. It is mainly consider the power and instrument transformers as well as electrical switchgears. Beside the most important test that can be done on the liquid insulation of

transformer oil - Dissolved Gas Analysis, which gives an early indication of abnormal behavior of the transformer, this work shows some interesting results in condition and quality of new and used oils. In this review huge experience in transformer oil testing is shown, with accent on some analytical testing methods and characteristic cases in practice.