

## **IX. HEMIJSKE INSTRUMENTALNE METODE U DIJAGNOSTICI ENERGETSKIH I MERNIH TRANSFORMATORA**

*U ovom poglavlju dat je pregled hemijskih metoda ispitivanja izolacionih ulja primenjenih u dijagnostici stanja energetskih i mernih transformatora kao i u proceni stepena degradacije i "realne starosti" izolacionog sistema transformatora. Ocena pogonske ispravnosti energetskih i mernih transformatora upotrebom gasne hromatografije unapređena je upotrebom statističke analize baze podataka, što čini predmet analize u ovom radu. Pored gasne hromatografije istaknut je značaj primene infracrvene spektrofotometrije (IR) i tečne hromatografije (HPLC) u analizi papirno-uljne izolacije. Istraživane su korelacije između metoda ispitivanja čvrste izolacije transformatora: indirektna metoda analize čvrste izolacije (2-FAL analiza furfurala) i direktna metoda ispitivanja stepena polimerizacije papira (Dp), na osnovu kojih je ocenjen značaj ovih ispitivanja kao dijagnostičkih metoda u evaluaciji pogonskog stanja čvrste izolacije transformatora.*

### **IX.1. UVOD**

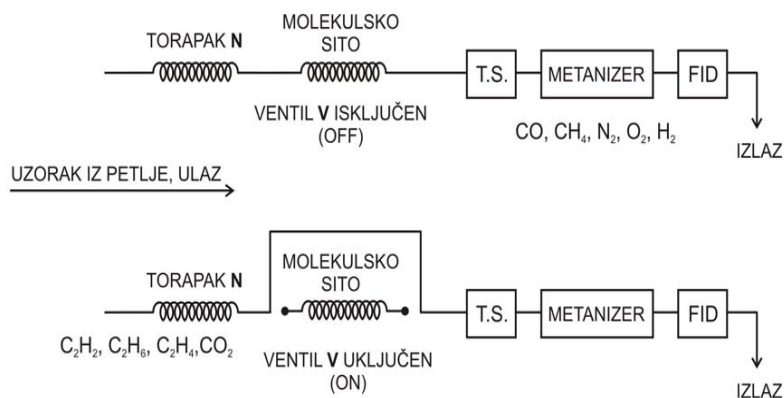
Istraživanja u oblasti primene instrumentalnih metoda analitičke hemije u ispitivanju pogonskog stanja transformatora i izolacionih osobina papirno-uljne izolacije započeta su primenom gasne hromatografije pre skoro četiri decenije, kada je uvedena nova koncepcija preventivnog održavanja mernih i energetskih transformatora. Preventivno održavanje energetskih transformatora ispitivanjem izolacionih ulja koje kao koncept živi u primeni kod nas već nekoliko decenija se kontinualno dopunjuje novim metodama ispitivanja ulja i papira koje proširuju uvid u "realno stanje" izolacionog sistema transformatora, i to: metoda tečne hromatografije – (HPLC) u analizi produkata razgradnje čvrste izolacije i infracrvena apsorpciona spektrofotometrija (IR) ulja u kvantifikaciji jedinjenja koja su pokazatelj dinamike procesa oksidacije ulja. Novi koncept preventivnog održavanja energetskih transformatora u pogonu se zasniva na principu "uvida u stanje", pri čemu se periodika ispitivanja podešava prema konkretnim potrebama i podrazumeva "on-line monitoring", što je kod nas još uvek u manjoj meri zastupljeno. Hemijska ispitivanja ulja koja čine novi koncept održavanja transformatora u pogonu su: gasnohromatografska analiza, određivanje sadržaja vode u ulju, ispitivanje fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja, analiza jedinjenja furana u ulju i u nekim slučajevima ispitivanja broja, veličine i vrste čestica u ulju, primenom atomske apsorpcione spektrofotometrije (AAS) i mikroskopske ili laserske tehnike [1]. Poslednje dve navedene metode su van predmeta ovog rada i čine predmet daljih studijskih istraživanja i rada u okviru Internacionalne Elektrotehničke Komisije – Tehnički komitet 10 (IEC TC 10) radne grupe 34. Posebno važno mesto zauzimaju analize stanja i upotrebljivosti čvrste izolacije transformatora u pogonu, primenom metode HPLC i određivanje sadržaja vode u čvrstoj izolaciji primenom električnih ispitivanja struja polarizacije i depolarizacije i povratnog napona (PDC, RVM). Izrada vodiča za interpretaciju analize furana u oceni stanja i upotrebljivosti čvrste izolacije transformatora u pogonu je predmet rada IEC TC 10 radne grupe 33. Procena rizika i analiza životnog veka električne opreme zasnovana na ispitivanjima papirno-uljne izolacije je svetski trend u analizi pouzdanosti i raspoloživosti električne opreme, što predstavlja predmet rada IEC TC 10 radne grupe 32. Hemijska laboratorija instituta "Nikola Tesla" učestvuje u radu pomenutih IEC TC 10 radnih grupa [2].

## IX.2. GASNOHROMATOGRAFSKA ANALIZA

Od 1975 godine u hemijskoj laboratoriji Instituta "Nikola Tesla" vrši se kontrola ispravnosti rada energetskih i mernih transformatora iz pogona, analizom gasova rastvorenih u transformatorskom ulju, metodom gasne hromatografije DGA (Dissolved Gass Analysis). Skoro da nema radne organizacije u zemlji, ne samo elektroprivredne već i brojnih industrijskih kompleksa (željezare, cementare, aluminijumski i metalurški kombinati, hemijska industrija) koja nije uvrstila u svoj program preventivne, periodične kontrole DGA ispitivanje. U slučajevima alarma Buholcove relejne zaštite kod energetskih transformatora, gasna analiza uzorka gasa releja, zajedno sa analizom uzoraka ulja, omogućava da se otkrije uzrok alarma, vrsta i intezitet prisutnog razaranja bolje nego bilo koja druga klasična metoda ispitivanja. DGA metoda se pokazala posebno efikasnom pri kontroli mernih transformatora koji nemaju relejnu zaštitu a poznato je da neispravan merni transformator u slučaju njegove eksplozije može da prouzrokuje havariju celog postrojenja.

### IX.2.1. Principi metode ispitivanja

Gasoviti produkti nastali razgradnjom ulja ekstrahuju se iz ulja pod vakuumom od  $10^{-4}$  do  $10^{-8}$  i ubacuju se u gasni hromatograf u struji inertnog gasa nosača, pri čemu se gasna smeša razdvaja na pojedinačna jedinjenja, zavisno od njihove hemijske strukture i afiniteta ka adsorpciji na određenim čvrstim materijalima. Vreme zadržavanja u koloni, tj. vreme adsorpcije i desorpcije određeno je hemijskim sastavom, polarnošću molekula, geometrijsko-sternim osobinama molekula i različito je za različite molekule, što predstavlja osnovni princip razdavanja komponenti u mešavini metodom gasne hromatografije.



Slika 1. Šematski prikaz principa razdvajanja i detekcije gasova primenom gasnog hromatografa za DGA.

Razdvajanje gasne smeše na pojedine komponente postiže se pomoću dve kolone u dvokanalnom sistemu gasnog hromatografa. U koloni  $C_1$  koja je napunjena adsorbentom - Porapakom N, razdvajaju se organske komponente mešavine kao i ugljendioksid ( $CO_2$ ) prethodno pomoću niki-katalizatora pretvoren u metan, a na drugoj koloni  $C_2$ , napunjenoj sa molekularnim sitom 13X, vodonik ( $H_2$ ), gasovi vazduha ( $O_2$  i  $N_2$ ) i ugljenmonoksid ( $CO$ ) takođe prethodno pretvoren u metan. Detekcija organskih komponenti se vrši pomoću plameno jonizacionog detektora, FID a neorganskih

pomoću detektora toplotne provodljivosti, TCD. Kao gas nosač koristi se argon. Analize se vrše izotermno na temperaturi kolona od 50°C ili sa temperaturnim programiranjem od 50 do 180°C .

### **IX.2.2. Metodologija tumačenja rezultata analize gasova rastvorenih u ulju (eng. Dissolved Gas Analysis – DGA) primenom gasne hromatografije**

Mineralna izolaciona ulja se sastoje od lanaca različitih ugljovodoničnih molekula koji sadrže hemijske grupe CH<sub>3</sub>, CH<sub>2</sub> i CH. U normalnim uslovima rada transformatora proces degradacije ulja, tj. kidanje C-C i C-H veza se odvija veoma sporo malim intenzitetom, tako da gasoviti produkti ove razgradnje ulja nastaju u malim količinama što se smatra normalnom posledicom pogonskih uslova rada. Prve metode za interpretaciju rezultata DGA 70-tih i 80-tih godina su dobijale nazive ili po laboratoriji u kojoj su razvijane ili po imenu autora. Tako na primer, metoda razvijena u Švajcarskoj (Brown Boveri) dobila je ime po autoru Dernenburgu (Dörnrenburg), u Engleskoj kao Rodžersova (Rogers) i Devisova (Davies) metoda, zatim metode razvijene u Belgiji (LABORELEC ) i Francuskoj (LCIE) dobile su naziv po imenu laboratorija [3].

### **IX.2.3. Metoda interpretacije Instituta „Nikola Tesla“ - Kvantifikacija normalnog radnog stanja transformatora**

Zahvaljujući redovnoj, periodičnoj gasnohromatografskoj kontroli velikog broja transformatora iz pogona i velikog broja izvršenih DGA po jednom transformatoru ili grupi transformatora istog tipa, proizvođača, uslova eksploatacije i godina starosti, rezultate gasnohromatografske analize je bilo moguće tumačiti sve više oslanjajući se na sopstvena iskustva. U našoj zemlji postoji preko 20 različitih proizvođača transformatora, različitih uslova i godina eksploatacije (od 1 pa do preko 40), pa je prilikom dijagnostike kvara kod transformatora stranih proizvođača bilo veoma teško konsultovati proizvođača. Stoga, dijagnostički koncept «INT» sastoji se od statističke analize rezultata ispitivanja u dva nivoa.

Prvi nivo: Za svaki pojedinačni transformator koji je praćen gasnohromatografskom analizom tokom proteklih najmanje 7 do 8 godina i koji je ocenjen kao ispravan - IEC šifra A (ispravan) vrši se statistička analiza rezultata, pri čemu se koristi normalna Gausova raspodela uzimajući vrednosti  $X_{sr} \pm \sigma$ ,  $2\sigma$   $3\sigma$  i  $1.96/(n)^{0.5}$  u definisanju «opsega normalnih koncentracija», što zapravo znači definisanje graničnih koncentracija gasova rastvorenih u ulju, za koje se smatra u  $\sigma$  (68 %),  $2\sigma$  (95.4 %), 95% ili  $3\sigma$  (99.6 %) normalno funkcinisanje transformatora. Zbog nedostataka primene Gausove raspodele za mali broj rezultata dodatno se analiziraju dobijeni rezultati statističke analize primenom Weibull-ove funkcije raspodele u cilju definisanja kumulativne funkcije raspodele i gustine raspodele verovatnoće i na taj način proceni validnost izračunatog «opsega normalnih koncentracija» za taj transformator pod uobičajenim pogonskim uslovima. Ovakve analize su posebno pouzdane kod transformatora iz prenosne mreže visokih naponskih nivoa, od 220 i 400kV, kao i kod blok transformatora u elektranama, koji nemaju regulacionu sklopku povezanu sa glavnim transformatorskim sudom i kod kojih nivo koncentracija gasova rastvorenih u ulju osciluje u manjoj meri. Kod transformatora sa regulacionom sklopkom, gde postoji mogućnost difuzija gasa acetilena iz sklopke u sud transformatora, moguća su veća i češća odstupanja naročito acetilena od „opsega normalnih koncentracija“, pa se u tim slučajevima više rukovodimo opštim gornjim graničnim vrednostima koncentracija – „INT norme“ napravljene na osnovu statističke

analize velikog broja gasnohromatografskih rezultata iz naše baze podataka (preko 9000 rezultata). Ukoliko su izmerene koncentracije svakog gasa ispod statistički izračunatih vrednosti, transformator se ocenjuje ispravnim. Autori, Mosinski i Piotrowski uvode u statističku analizu proračun na osnovu četiri funkcije raspodele: Normalna, Log-normalna, Weibull-ova, i Gumbel-ova u cilju dobijanja upozoravajućih signala pojave kvara na osnovu izračunatih koeficijenata heterogenosti navedenih funkcija raspodele [4]. U proteklih deset godina razvijeni su i komercijalni programski paketi za tumačenje i analizu rezultata DGA.

Drugi nivo: Opšte granične vrednosti za svaki gas pojedinačno, a za sve velike statističke populacije transformatora su dobijene statističkom analizom celokupne baze podataka. Opsezi graničnih vrednosti «INT» dobijeni su analizom rezultata gasnohromatografskih ispitivanja ulja primenom Gaussove normalne raspodele, za 95 % nivo pozdanosti ( $X_{sr} \pm 2\sigma$ ). Rezultati gasnohromatografskih ispitivanja ulja podeljeni su prema konstrukciji datih transformatora u dve osnovne populacije, transformatori sa regulacionom sklopkom i oni bez regulacione sklopke, prvenstveno zbog analize opsega koncentracija acetilena, koji može da difunduje iz suda regulacione sklopke u sud aktivnog dela transformatora. Poredeći ih sa graničnim vrednostima inostranih laboratorija, «INT» vrednosti su najpribližnije vrednostima koncentracija gasova kvara laboratorije ALSTHOM i laboratorije WESTING-HOUS (tabela 1).

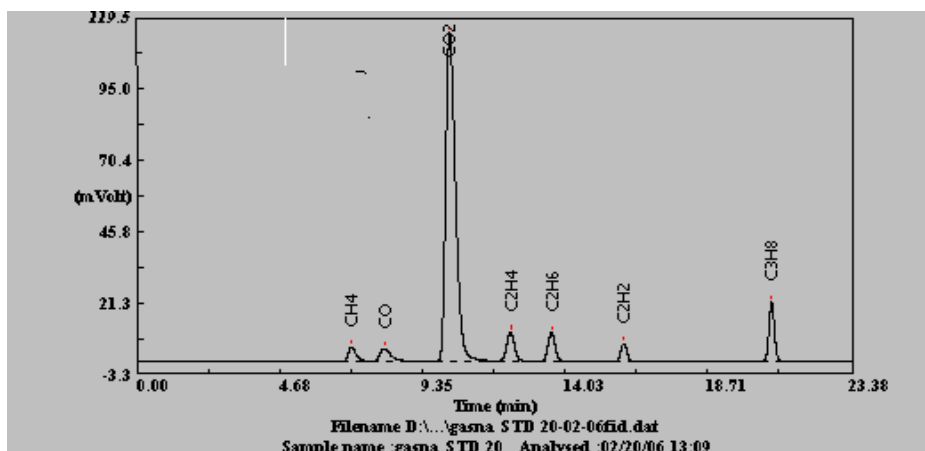
Periodika ispitivanja transformatora gasnohromatografskom analizom kod nas u određenoj meri je slična periodici u zemljama zapadne Evrope, pri čemu je prihvaćen koncept održavanja «uvidom u stanje». Veći akcenat se stavlja na ulogu eksperata u dijagnostici i evaluaciji dobijenih rezultata i **definisaju frekvencije ispitivanja za svaki konkretan slučaj**, što predstavlja i dugogodišnju praksu hemijske laboratorije.

#### **IX.2.4. Dijagnostika kvarova**

Pod uticajem električnih i termičkih kvarova dolazi do kidanja veza C-C i C-H i stvaranja nestabilnih radikala ili jona kao što su  $H\cdot$ ,  $CH_3\cdot$ ,  $CH_2\cdot$ ,  $CH\cdot$  ili  $C\cdot$  koji se vrlo brzo rekombinacijom vezuju u gasne molekule vodonika (H-H), metana ( $CH_3-H$ ), etana ( $CH_3-CH_3$ ), etilena ( $CH_2=CH_2$ ), i acetilena ( $CH\equiv CH$ ) a u manjoj meri nastaju i gasovi sa 3 i 4 ugljenikova atoma. Pored njih mogu se stvoriti u zavisnosti od inteziteta kvara i čestice ugljenika (čadi) i ugljovodonični polimeri (x-voskovi). Stvoreni gasovi se rastvaraju u transformatorskom ulju i/ili akumuliraju u Buholcovom releju kao slobodni u slučaju brzog stvaranja većih količina. Kvarovi male gustine energije kao što su parcijalna pražnjenja koja nastaju najčešće u gasnim šupljinama okruženim uljem ili uljem impregnisanim celuloznim materijalima, kidaju slabije veze C-H (energija homolitičkog cepanja C-H veze iznosi 338 kJ/mol) i reakcijama jonizacije stvara se vodonik kao glavni gas kvara praćen metanom i etanom. Električni kvarovi veće gustine energije kao što je električni luk ili termički kvarovi viših temperatura kidaju lance C-C i rekombinacijom se stvaraju gasovi sa jednostrukom vezom etan (607 kJ/mol), sa dvostrukom vezom etilen (720 kJ/mol) i sa trostrukom vezom acetilen (960 kJ/mol). Stoga pri temperaturi toplih mesta iznad 500°C dominantan gas je etilen dok za formiranje acetilena kao dominantnog gasa je potrebna temperatura od najmanje 800°C do 1200°C. To je temperatura električnog luka i tada obično dolazi i do karbonizacije ulja odnosno do stvaranja čadi.

Tabela 1. Granične vrednosti koncentracija gasova kvara rastvorenih u ulju energetskih transformatora

Laboratorija	Transformator		Granične vrednosti koncentracija (mg/kg)						
	vrsta	starost (god)	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
HYDRO-QUEBEC (Kanada)	bez regulac. sklopke	do 3	110	40	20	50	50	1000	5000
		3-6	150	100	60	125	70	1000	10000
		6-15	250-500	100	150	125	75-100	1000	10000
		>15	500	150	150	150	100	1500	12000
ENEL (Italija)	blok	>10000h	100	250	5	50	300	1000	10000
							$\Sigma(H_2 + HC) < 500$		
WESTING HOUSE (SAD)	blok prenosni		240	160	11	190	115	580	
			100	200	35	30	665	350	
OLBUCH (Austrija)			100	200	30	300	200		
LABORELEC ( Belgija) 1974 1986	blok- prenosni bez.-reg. sklopke; sa regul sklop.	do 5	80	200	5	100	200	1000	10000
		6-15	200			$\Sigma(C_1 - C_2) = 300$	400		
		> 15	100	70	10	40	500	9000	
		do 5	100	40-200	10-20	200	200	1500	1800
		6-15	100	200	50	200	40	1500	15000
		> 15	100	60	40	80	700	8000	
SSSR, Mađarska	blok transformatori prenosni transform.		80	30	2	30	30	180	1000
			100	50	2	30	30	360	1700
Japan	500kV 275kV		300	100	50	100	50	200	
			400	200	50	300	150	300	
ALSTHOM (Francuska)	bez. reg. sklopke sa reg. sklopkom		100	200	20	200	200	1000	10000
			200	200	200	200	200	1000	10000
Nemačka			100	200	30	300	200		
GEN.ELEC. (SAD)		0-3	200	50	25	100	200	200	2000
		4-6	500	100	25	200	400	500	5000

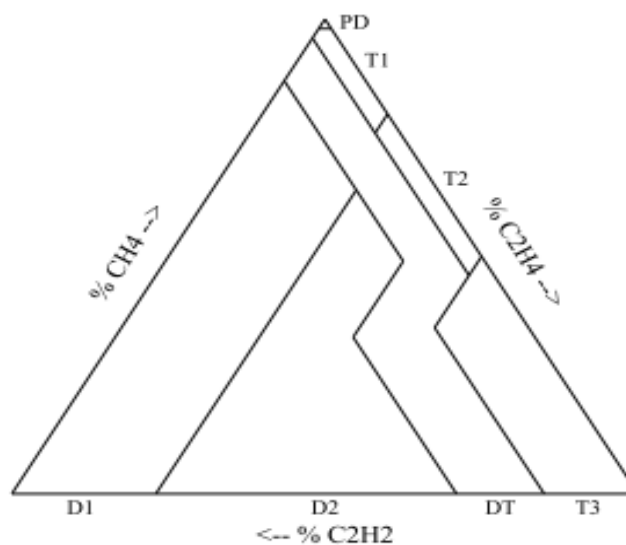


*Slika 2. Hromatogram jednog uzorka ulja sa rastvorenim ugljovodoničnim gasovima i ugljen monoksidom*

Prvi idejni tvorci dijagnostike transformatora iz pogona **analizom u ulju rastvorenih gasovitih produkata razaranja izolacije**, DGA, su M.Thibault, Y.Rabaud i J.Galand iz laboratorije LCIE u Francuskoj. Brojne radove su publikovali u RGE počevši od 1968 godine iz kojih su dobijena prva saznanja o ovoj metodi i njenoj praktičnoj primeni [5,6,7]. Metoda LCIE se zasniva na čisto kvalitativnom razmatranju sastava smeše transformatorskih gasova u ulju, pri čemu se podela vrši na 4 osnovne grupe (grupa acetilena, etilena, ugljendioksida i vodonika) u zavisnosti od toga koji je gas prisutan a koji odsutan. Smeša gasova koja u svom sastavu sadrži acetylen uvek se svrstava u grupu acetilena a to znači da je u pitanju električno pražnjenje različitog intenziteta. Intenzitet električnog pražnjenja i izolacioni materijal u kome se odvija pražnjenje (ulje i/ili celuloza) određeni su sastavom gasova koji prate acetylen. Ako u smeši gasova nema acetilena a prisutan je etilen, onda se radi o grupi etilena koja obuhvata toplotno razaranje izolacije usled lokalnih pregrevanja a Intenzitet i materijal koji je obuhvaćen razaranjem se određuje na osnovu gasova koji prate etilen. Ako nema ni acetilena ni etilena, radi se o grupi ugljendioksida (termičko starenje papira ili vrlo slaba parcijalna pražnjenja u papiru) ili ako je prisutan samo vodonik praćen eventualno metanom radi se o grupi vodonika. Grupa vodonika obuhvata veoma slaba parcijalna pražnjenja u mehurićima gasa u ulju ili su to prvi simptomi nastajanja intenzivnijeg kvara električne prirode u kom slučaju sastav gasova vremenom prelazi u grupu acetilena.

Metoda Dernenburga razlikuje tri karakteristična slučaja i to slaba električna pražnjenja ili parcijalna pražnjenja u gasnim šupljinama, jaka električna pražnjenja i toplotno razaranje izolacije. Dernenburg prvi daje ideju da se za osnovu metoda interpretacije rezultata DGA uzmu **odnosi gasnih koncentracija pojedinih gasova** što su prihvatili i mnogi drugi autori i što se praktično zadržalo sve do danas. Pri tome on koristi 4 odnosa gasnih koncentracija od kojih su dva odnosa najznačajnija jer su prihvaćena od skoro svih kasnije datih metoda, a to su CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> i C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>. Preostala dva odnosa su C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> i C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/CH<sub>4</sub> [9,10]. Rodžers dalje razvija Dernenburgovu metodu dajući umesto tri, 12 karakterističnih slučajeva uz izmenu poslednja dva odnosa gasnih koncentracija koja su kod njegove metode C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/CH<sub>4</sub> i C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>. Intresantna je ideja koju je za interpretaciju rezultata DGA prvi dao Devis iz CEGB iz Engleske. Kao što je poznato molekuli transformatorskih gasova sadrže u sebi atome vodonika,

ugljenika i kiseonika. Devisova metoda se sastoji u određivanju udela ovih atoma u stvorenim produktima razaranja izolacije transformatora, pri čemu se uzimaju u obzir samo vodonik, ugljovodonici sa jednim i dva ugljenikova atoma i ugljenmonoksid dok se CO<sub>2</sub> i ugljovodonici sa 3 i 4 ugljenikova atoma ne uzimaju u obzir. Rezultat se unosi u trougaoni dijagram u kome određene zone odgovaraju nekom od sledećih slučajeva: normalno oksidaciono starenje, pregrevanje i parcijalno pražnjenje. Kod Devisove metode se vrsta degradacije izolacije određuje na osnovu položaja tačke u trougaonom dijagramu. Devisovu metodu kasnije je koristio i razradio Duval iz laboratorije Hydro-Quebec iz Kanade .



*Slika 3. Duval-ov trougao triangle*

Dosadašnje naše iskustvo i iskustvo stranih laboratorija pokazalo je da se u praksi daleko češće javljaju kvarovi koji izazivaju i električno i termičko razaranje izolacije istovremeno. Čest slučaj kod transformatora sa regulacionom sklopkom je prisustvo uvećane koncentracije acetilena kao posledice prodiranja gasa iz sklopke a ne razvoja električnog kvara, što, na žalost, nekada može da maskira pojavu i razvoj električnog kvara.

Praćenje brzine stvaranja gasa usled kvara, može se meriti iz niza uzastopnih kvantitativnih analiza gasa u ulju u vremenima  $t_1, t_2, t_3$  itd. Za svaki nađeni gas, razlika između uzastopnih koncentracija  $Y_2 - Y_1 = \Delta Y_1, Y_3 - Y_2 = \Delta Y_2$  itd. pokazuje količine gasova proizvedenih u svakom intervalu. Potrebne vrednosti intervala između analiza zavise od intenziteta kvara, koji se procenjuje na osnovu proračuna stepena zasićenja ulja gasovima kvara i zbira koncentracija zapaljivih gasova kvara. Zavisno od toga da li je kvar termičke ili električne prirode, periodika pooštrenih gasnohromatografskih analiza se određuje prema svakom zasebnom slučaju. Najčešće se kod termičkih kvarova velikog inteziteta preporučuju nedeljne analize, a kod električnih se u slučajevima većeg intenziteta kvara ne preporučuje dalji pogon transformatora, ukoliko je to moguće u realnim uslovima eksploatacije.

Izračunavanje porasta koncentracija gasova kvara, izraženih u ml/dan prema IEC 60599 je [14] :

$$\text{Brzina stvaranja gasa, ml/dan} = c \frac{(Y_2 - Y_1)m}{(d_2 - d_1)\rho} \quad (1)$$

Gde je:

- $Y_1$  - vrednost koncentracije gasa dobijena prema referentnoj analizi,  $\mu\text{L/L}$
- $Y_2$  - vrednost koncentracije gasa dobijena prema poslednjoj analizi,  $\mu\text{L/L}$
- $Y_2 - Y_1$  = brzina proizvodnje gasa,  $\mu\text{L/L}$
- $m$  - masa ulja, kg
- $d_1$  - datum za  $Y_1$
- $d_2$  - datum za  $Y_2$
- $\rho$  - gustina ulja,  $\text{kg/m}^3$

Stepen zasićenja ulja gasovima kvara, analiza gasa u Buholc releju i proračun ekvivalentnih koncentracija gasova u tečnoj fazi, uzimanjem uzoraka ulja iz više nivoa u dijagnostici kvarova ima značaj u definisanju lokacije kvara i proceni brzine i intenziteta razvoja kvara, na osnovu razlike u sadržaju gasova u gasnoj mešavini i količine gasa rastvorene u ulju.

*Tabela 2. Brzina proizvodnje gasova rastvorenih u ulju, ml/dan (IEC 60599)*

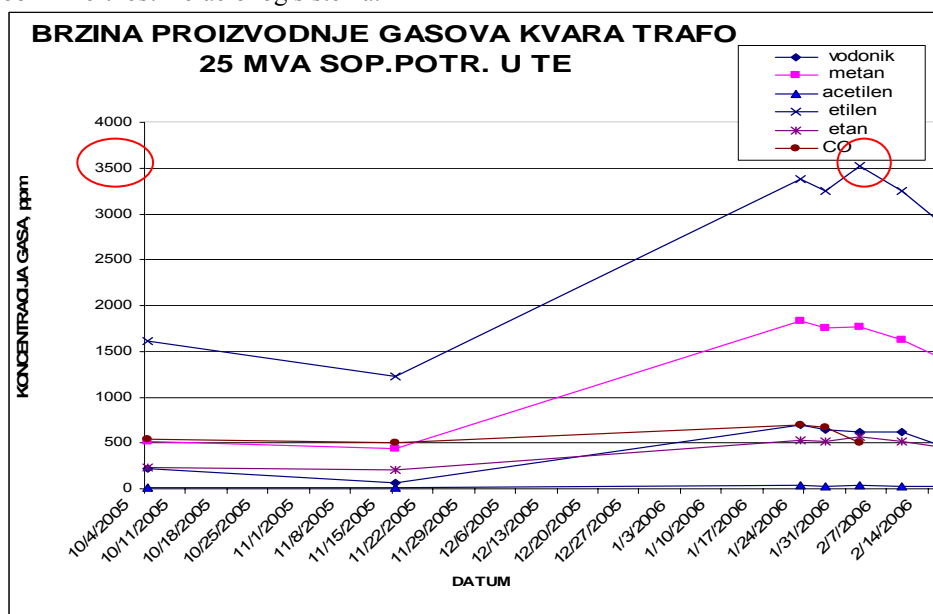
Brzina razvoja gasa	vodonik	metan	acetilen	etilen	etan
uzorak ulja	137	303	5	471	69
IEC 60599	< 5	< 2	< 0.1	< 2	< 2
Revidirane IEC 60599 granice	< 50	< 20	< 1	< 20	< 20

Brzine proizvodnje gasova rastvorenih u ulju je daleko iznad graničnih vrednosti, posebno brzina proizvodnje etilena, koji predstavlja ključni gas koji ukazuje na prisustvo intenzivnog kvara termičke prirode. Granične vrednosti IEC 60599 su tokom 2002 revidirane jer je na osnovu statističkih analiza većeg broja rezultata u okviru GIRE radne grupe T.F.15.0101., zaključeno da su one nerealno niske. Uzimajući u obzir i revidirane IEC 60599 granice, u datom primeru se vidi da su koncentracije gasova više desetina puta prevazišle granične vrednosti, što ukazuje jasno da dati rezultati upućuju na zaključak o postojanju **intenzivnog** kvara termičke prirode sa temperaturama toplih mesta iznad  $700^\circ\text{C}$ .

*Slučaj transformatora sa intenzivnim termičkim kvarom*

Kod transformatora sopstvene potrošnje na osnovu rezultata gasnihromatografske analize ulja utvrđeno je prisustvo termičkog kvara, sa temperaturama toplih mesta iznad  $700^\circ\text{C}$ . Izmerne koncentracije etilena kao glavnog gasa kvara su daleko iznad graničnih vrednosti (preko  $3500 \text{ mg/kg}$ ). Brzina razvoja kvara je daleko iznad dozvoljenih vrednosti a stepen zasićenja gasovima u periodu kvara nije prelazio 60 %. Etilen kao vodeći gas kvara je veoma dobro rastvorljiv u ulju i postojeći kvar je intenzivan ali nije incidentan tj. razvija se u toj meri da ne dolazi do naglog izdvajanja gasova u Buholc relej. S obzirom na činjenicu da transformator nije bilo moguće isključiti iz pogona zbog datih uslova u elektrani, od 24. Januara 2006 transformator je stavljen u prazan hod drugi put i podvrgnut posebnoj pooštrenoju gasnihromatografskoj analizi na svakih sedam dana u cilju daljeg praćenja stanja transformatora i eventualne procene lokacije termičkog kvara. Zaključak o lokaciji kvara može se uspostaviti samo dužim praćenjem promena koncentracija gasova rastvorenih u ulju u vremenskim intervalima najkraće na pet do sedam dana. Oglad praznog hoda je između ostalih razloga izveden sa ciljem da se sazna više o lokaciji

kvara. Ukoliko bi došlo do porasta koncentracija gasova kvara u praznom hodu transformatora to bi ukazalo na lokaciju kvara u magnetnom kolu. U ovom slučaju prva tačka porasta koncentracije etilena (slika 4. tačka - 07/02/06) predstavlja očigledno samo zakasneli odziv «inertnog» izolacionog sistema, jer je tokom narednih merenja ustanovljen kontinuiran pad koncentracija gasova. Na osnovu ovog rezultata verovatnija je mogućnost postojanja termičkog kvara na kontaktima i namotajima. Ovakvi primeri ukazuju da je praćenje transformatora sa termičkim kvarom u režimu praznog hoda uz gasnrohromatografsko praćenje sadržaja gasova veoma korisna metoda ukoliko se vrši u odgovarajućim vremenskim intervalima tokom odgovarajućeg perioda, uzimajući u obzir inertnost izolacionog sistema.



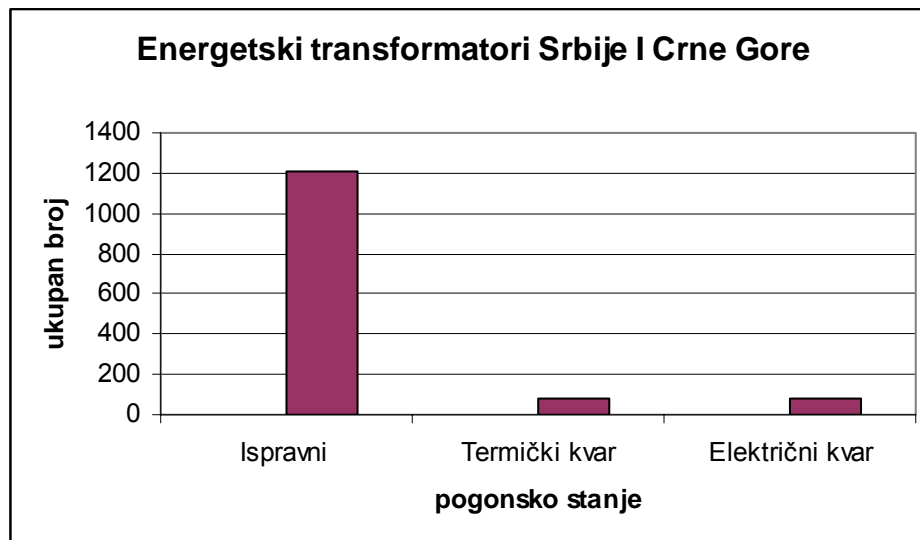
Slika 4. Promena koncnetracija «gasova kvara» sa vremenom

Statistička analiza baze podataka ispitivanja sadržaja gasova u ulju metodom gasne hromatografije ukazuje na činjenicu da je u našem elektroenergetskom sistemu 87 % transformatora u ispravnom stanju i 13 % sa pojavom kvara, pri čemu je približno jednako učešće električnih (6.0%) i termičkih kvarova (6.1 %), sa dominantnom prosečnom starošću transformatora preko 25 godina (slika 5).

#### IX.2.5. Gasovi u normalnom radnom režimu transformatora

Pored već napred navedenih ugljovodoničnih gasova koji u normalnom radnom režimu nastaju u malim koncentracijama, što je bio predmet analize prethodnih poglavlja, oksidacijom ulja u dužem vremenskom periodu stvaraju se manje količine i ugljenmonoksida i ugljendioksida i smanjuje se odnos koncentracija kiseonika i azota. Ugljenmonoksid i ugljendioksid su najvećim delom produkt razaranja celuloznih materijala, odnosno kidanja dugačkih lanaca glukočnih polimera C-O koji su daleko manje stabilni od ugljovodoničnih lanaca ulja. Već na temperaturi iznad 115°C dolazi do kidanja ovih lanaca da bi na temperaturi od 300°C došlo do potpune karbonizacije celuloze. Pored ova dva gasa degradacijom celuloze stvara se i voda i u zanemarljivo malim količinama ugljovodonični gasovi i derivati furana. Količine stvorenih CO i CO<sub>2</sub>

ne zavise samo od intenziteta kvara već i u znatnoj meri od vlažnosti izolacije i količine rastvorenog kiseonika odnosno vazduha u ulju.



*Slika 5. Energetski transformatori u SCG*

Postoje i drugi izvori stvaranja pomenutih gasova koji nisu rezultat prisutnog kvara u transformatoru, naročito vodonika. Tako, na primer, kod sasvim nove opreme koja nikada nije bila pod naponom, na takve pojave može da ukaže prisustvo vodonika uz potpuno odsustvo ostalih ugljovodoničnih gasova. Fenomen stvaranja vodonika primećen je i kod transformatora u eksploataciji. Proizvodnju od nekoliko hiljada mg/kg vodonika prati odsustvo drugih ugljovodoničnih gasova – metana, etana, acetilena, etilena, a pojava se dešava u određenim vremenskim ciklusima. Ovaj fenomen je teško precizno okarakterisati, ali neka naša iskustva i saznanja mogu dati sledeći pogled na ovu pojavu. Konstrukcioni nedostaci i nekompatibilnost materijala u transformatoru, pojedini materijali (pojedini čelici, prisustvo Cinka (Zn)), utiču na katalitički proces stvaranja vodonika u procesu dehidrogenovanja ulja, ili u reakciji sa Cinkom. Takozvani „hemijski vodonik“ koji nastaje u reakciji sa pojedinim metalima nije direktno povezan sa postojanjem termičkih ili električnih kvarova u transformatoru. Kod nekih konstrukcija prisustvo magnetnih materijala umesto nemagnetnih može uzrokovati nastanak velike količine vodonika i postojanje vrtložnih struja u nekim slučajevima može kao posledicu imati pojavu i razvoj intenzivnog termičkog kvara. Prisustvo izmerenih visokih koncentracija, nekoliko hiljada mg/kg vodonika bez prisustva uvećanih koncentracija drugih gasova, najverovatnije ne ukazuje na prisustvo parcijalnih pražnjenja i nije posledica velikog opterećenja transformatora, već je kao što je napred navedeno verovatno posledica prisustva nekompatibilnih konstrukcionih materijala [15, 16].

Kod većeg broja energetskih transformatora u elektranama i prenosnoj mreži uočene blago povišene koncentracije vodonika (nekoliko stotina mg/kg) su posledica povećanog stepena opterećenja transformatora i predstavljaju normalnu pojavu.

### **IX.3. INFRACRVENA SPEKTROFOTOMETRIJA: ANALIZA HEMIJSKOG SASTAVA ULJA I OCENA DINAMIKE OKSIDACIJE ULJA**

Metoda infracrvene spektrofotometrije (IR) u analizi izolacionih ulja ima nekoliko važnih primena, pre svega pri oceni stanja izolacionog ulja sa aspekta njegovih primenskih osobina. Pod time se misli na osobine ulja koje utiču na svojstva odvođenja toplote i oksidacionu stabilnost ulja u eksploataciji.

Infracrvena spektrofotometrija omogućava da se ispitivanjem uzoraka ulja odredi njihov hemijski sastav, tj. strukturno-grupni sastav sledećih grupa ugljovodonika: aromatskih, parafinskih i naftenskih, kao i određivanje specifičnih dodataka ulju, antioksidanata na bazi aromatskih ugljovodonika (di.terc.butil-para-krezol - DBPC) koji se ulju dodaju radi poboljšanja oksidacione stabilnosti i produženja radnog veka ulja.

Poznavanjem hemijskog sastava ulja mogu se dobiti informacije o stepenu rastvorljivosti vode i drugih polarnih jedinjenja u ulju, kao i određena gas-absorbicija svosjatva ulja, što je za neke prijemne od velikog značaja. Stepenu rastvaranja vode i polarnih produkata starenja ulja i papira u ulju, je važan parametar u oceni izolacionih svojstava ulja i veze sa električnim osobinama. Poznato je da ulja koja u većoj meri mogu da rastvore vodu i ostala polarnija jedinjenja su ulja sa relativno visokim sadržajem aroamtskih jedinjenja. Na ovaj način određivanje sadržaja aromatskih i karbonilnih jedinjenja metodom IR pruža nam važne informacije koje utiču na bolje poznavanje raspodele produkata degradacije dvojnog papirno-uljnog izolacionog sistema u korelaciji sa funkcionalnim, prvenstveno električnim osobinama [17].

#### **IX.3.1. Uticaj hemijskog sastava ulja na oksidacionu stabilnost**

Sadržaj aromatskih ugljovodonika (CA) je jedan od ključnih parametara koji određuju oksidacionu stabilnost ulja. Posebno je važan udeo monocikličnih aromatskih struktura (MA) u odnosu na policiklične (PAH), čiji je nizak sadržaj veoma je bitan sa ekološkog stanovišta, što pak nepovoljno utiče na gas-absorbicijone osobine ulja [18,19]. Očigledno je da za različite primene ulja neophodno definisati optimalnu hemijsku strukturu ulja sa najboljim datim primenskim osobinama.

$$\%CA = 1.2 + 9.8 \frac{\log_{10} \frac{I_0}{I}}{l} \quad (2)$$

gde je:

CA – maseni procenat aromatskih C atoma

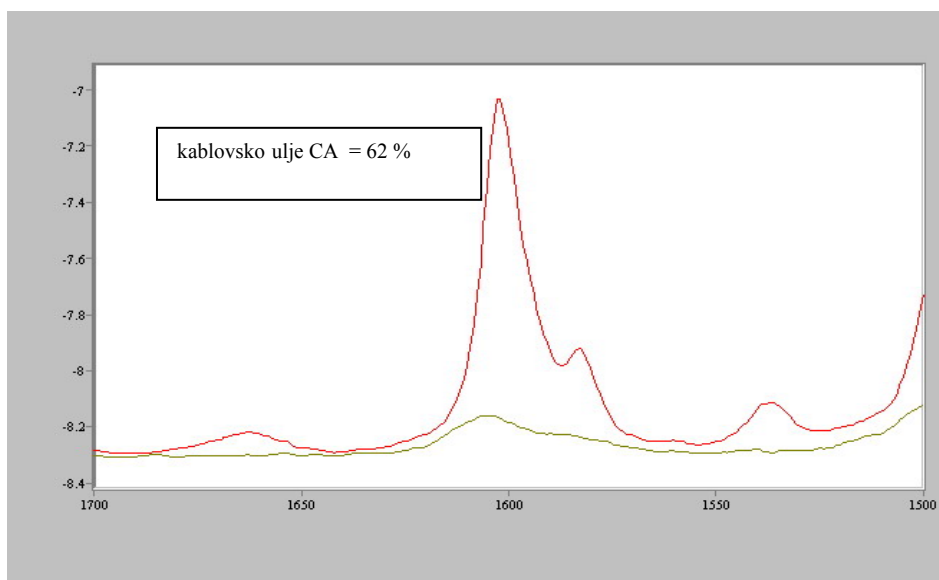
l – debljina ćelije, mm

I<sub>0</sub> – intenzitet ulaznog zraka

I - intenzitet izlaznog zraka

#### **IX.3.2. Uticaj hemijskog sastava ulja na gas absorbicijone karakteristike ulja**

Aromatski ugljovodonici imaju najbolje gas-absorbicijone karakteristike, pa se kablovska ulja gde je ovo jedna od najvažniji primenskih osobina koje ulje treba da ima i prave na bazi čistih aromatskih ugljovodonika, sintetičkih alikil -benzola. (slika 6). U nekim primenama ulja za transformatore takođe se zahtevaju dobre gas-absorbicijone karakteristike, visoka mogućnost gašenja električnog luka i absorpcije gasova.



*Slika 6. Koncentracija aromatskih ugljovodonika sintetičkog kablovskog ulja Pirelli i mešavine sa mineralnim uljem Y 3000 u odnosu 50%/50%*

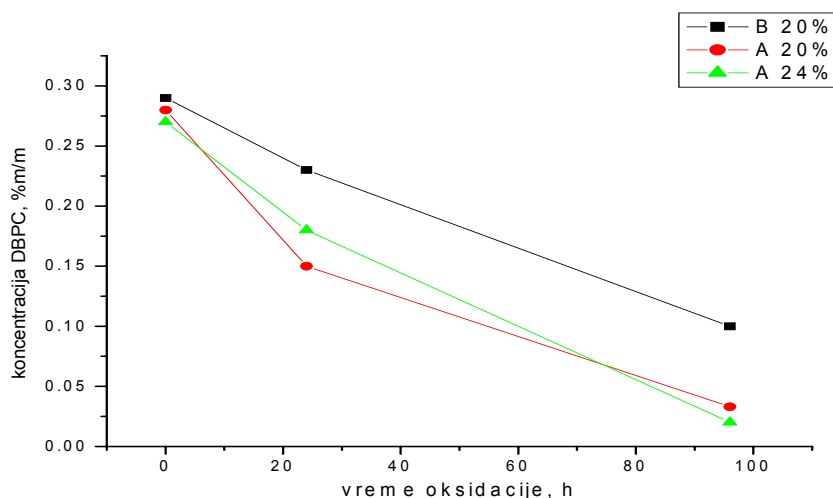
### **IX.3.3. Uticaj hemijskog sastava ulja na nisko- temperaturne osobine izoalcionih ulja**

Tačka stinjanja i ostale nisko-temperaturne osobine ulja su u funkciji sadržaja parafinskih ugljovodonika koji imaju osobinu da kristališu na temperaturama ispod 0°C stepeni, zavisno od molske mase i strukture, (linerani ili razgranati). U tom smislu prisustvo većeg udela, posebno linerarnih parafinskih struktura nepovoljno utiče na tačku stinjanja i kinematičku viskoznost izolacionih ulja, jer se time smanjenjuje efikasnost odvođenja toplote. Kod izolacionih ulja parafinske baze, ukoliko u procesu proizvodnje nisu u dovoljnoj meri uklonjeni parafinski ugljovodonici, ulju se mogu i dodati posebna jedinjenja koja utiču na sniženje tačke stinjanja ulja, tzv. »depresanti tačke stinjanja«.

### **IX.3.4. Određivanje sadržaja inhibitora DBPC u ulju**

IR analiza sadržaja DBPC u ulju omogućuje da se u toku eksploatacije ulja u transformatoru prati utrošak DBPC i time prati brzina oksidacije ulja. U slučajevima kada se koncentracija DBPC spusti ispod 0.01 % tada se, uzimajući u obzir i vrednosti drugih karakteristika ulja, preporučuje do-inhibiranje ulja i/ili regeneracija adsorbentima, ili zamena ulja.

U toku testa oksidacije ulja u laboratorijskim uslovima (test veštačkog starenja prema metodi IEC 61125 C) praćenje utroška inhibitora -DBPC sa vremenom pomaže u određivanju kinetike hemijske reakcije oksidacije što može biti veoma značajno tokom praćenja karakteristika ulja u eksploataciji.



Slika 7. Utrošak DBPC sa vremenom tokom testa oksidacije prema IEC 61125 C

#### IX.4. ANALIZA PAPIRNO-ULJNE IZOLACIJE

##### IX.4.1. Sadržaj vode

Voda je jedan od ključnih parametara degradacije papirno-uljnog izolacionog sistema [20,21]. Tokom redovne preventivne kontrole transformatora, ispitivanje sadržaja vode u ulju je veoma važno sa dva aspekta:

- 1 Povišen sadržaj vode u ulju može biti inicijator električnih pražnjenja
- 2 Povišen sadržaj vode u ulju je promoter degradacije ulja i posebno čvrste izolacije, pri čemu voda nastaje i kao proizvod degradacije papira
- 3 U uslovima povišenog sadržaja vode produkti degradacije celulozne izolacije se u većoj meri rastvaraju u ulju

Posebno je važno istaći da analiza sadržaja vode u ulju i papirno-uljnom izolacionom sistemu se može tumačiti samo ukoliko se poznaje i podatak o radnoj temperaturi ulja tokom eksploatacije. Na različitim temperaturama ulja prisutna voda u izolacionom sistemu papir-ulje je raspodeljena između čvrste i tečne izolacije u različitim masenim odnosima. Najveći deo vode je adsorbovan u čvrstoj izolaciji (oko 90 %). Pri povišenju temperature voda “migrira” iz čvrste u tečnu izolaciju i obrnuto kada se snizi temperatura. Difuzija vode iz čvrste u tečnu izolaciju i obrnuto opisana je eksponencijalnom funkcijom [22,23, 24]:

$$W_s = W_{ulje} e^{(-B/T)} \quad (3)$$

gde je B – konstanta koja zavisi od hemijskog sastava, tj. od sadržaja aromatskih ugljovodonika

- Korekcije i proračun važi za transformatore u pogonu u uslovima:
- Kada su temperature uzorkovanja ulja  $\geq 200C$
- Korekcija se ne primenjuje kod regulacionih sklopki i drugih električnih aparata kod kojih celuloza nije prisutna, ili je prisutna u veoma malom odnosu prema tečnoj izolaciji.
- Kada nije prisutna slobodna voda.

S obzirom da je najveći udeo vode i produkata degradacije čvrste izolacije »zarobljen« u čvrstoj izolaciji, to se u preventivnoj kontroli i dijagnostici stanja izolacionog sistema ispitivanjem uzoraka ulja, preporučuje uzorkovanje ulja na najvišim radnim temperaturama transformatora u toku najdužeg perioda eksploatacije.

Procena pogonskog stanja čvrste izolacije je veoma važan zadatak u ispitivanju i dijagnostici energetskih transformatora. U proteklih nekoliko godina hemijske i električne metode doživele su ekspanziju u primeni i ispitivanju čvrste celulozne izolacije transformatora. Metode se mogu podeliti na direktne i indirektne.

Direktne metode ispitivanja su:

*Hemijske metode*

- Određivanje sadržaja vode u celulozi
- Ispitivanje stepena polimerizacije papira – DP.

*Električne metode*

- Konvencionalna električna ispitivanja i novije metode frekventnog odziva – merenja struja polarizacije i depolarizacije (PDC), merenja povratnog napona (RVM) pomoću kojih se određuju zbirno voda i polarna jedinjenja u čvrstoj izolaciji [22, 25, 28].

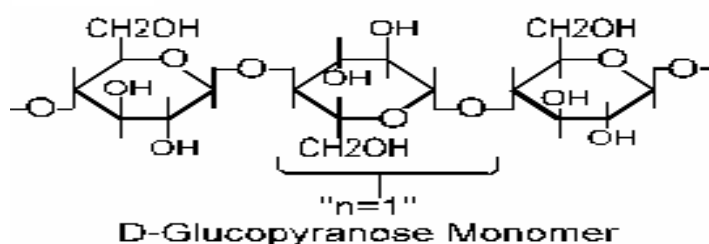
Posredne - hemijske metode

- Analiza derivata furana rastvorenih u ulju

U kojoj meri će se furani rastvoriti u ulju zavisi od temperature, ovlaženosti izolacionog sistema, hemijskog sastava ulja i derivata furana, čija je rastvorljivost u ulju definisana koeficijentom raspodele između papira i ulja [23].

#### **IX.4.2. FURANI - Hemija i mehanizmi degradacije**

Izolacioni papir se sastoji od celuloznih vlakana koja su sačinjena od velikog broja makromolekula različite dužine i molske mase, povezanih slabim OH- vezama. Celuloza je po hemijskom sastavu linearni makromolekul, sačinjen od većeg broja monomernih jedinica, molekula glukoze, koji su povezani glukozidnim vezama. Stepennost polimerizacije papira – Dp je mera dužine makromolekula celuloze i predstavlja srednji broj monomernih jedinica glukoze u odnosu na ceo makromolekul celuloze.



*Slika 8. Makromolekul celuloze*

Tokom eksploatacije u prisustvu povišenih temperatura, kiseonika i vode dolazi do degradacije celuloznih makromolekulskih lanaca. Glavni promotori degradacije celulozne izolacije su: voda, povišena temperatura, kiseonik i kiseli produkti starenja ulja. Termička degradacija se odvija na temperaturama iznad 120°C, pri čemu dolazi do raskidanja glukozidnih veza i stvaraju se molekuli glukoze, oksidi ugljenika, voda i kiseline. Voda je najveći degradirajući agens čvrste izolacije transformatora. U prisustvu vode i kiselina dolazi do hidrolitičke degradacije koja se odvija i na

temperaturama nižim od 150°C, pri čemu dolazi do otvaranja prstena glukoze, kidanja C- C veza, stvaranja derivata furana i ostalih produkata degradacije [22,26].

#### IX.4.2.1. Raspodela produkata degradacije u izolacionom sistemu papir-ulje

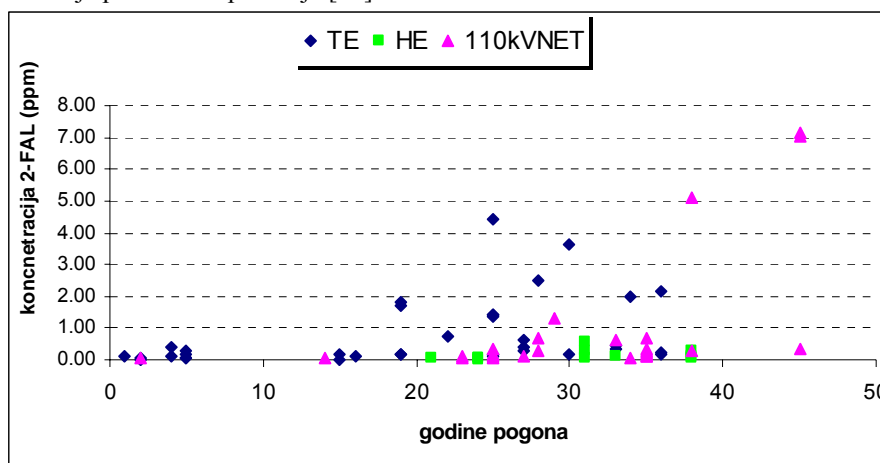
Većina derivata furana nastalih degradacijom celuloznih makromolekulskih lanaca je adsorbovana u papiru. Količina adsorbovanih jedinjenja furana zavisi od koeficijenta raspodele na datoj temperaturi i sadržaja vode u papiru. Na određenoj temperaturi, pri određenom sadržaju vode, koeficijent raspodele 2-furfurala iznosi 0.83, što znači da je 83% rastvoreno u ulju, pri čemu je potrebno naglasiti da je 2-furfural jedinjenje koje je najviše rastvorljivo u ulju od svih derivata furana koji nastaju degradacijom celulozne izolacije (npr. koeficijent raspodele 5-hidroksimetil-2-furfurala iznosi 0.11). Zbog svojih osobina visoke rastvorljivosti u ulju i dobre termičke stabilnosti u odnosu na ostale derivate, 2-furfural (2-FAL) je najbolje jedinjenje za praćenje promena u stepenu degradacije celulozne izolacije. Povećanje sadržaja vode u izolacionom sistemu dovodi do povećanja brzine degradacije čvrste izolacije, kao i do povećanja stepena rastvorljivosti derivata furana u ulju. Ravnotežna rastvorljivost derivata furana u izolacionom sistemu papir-ulje pomerena je ka ulju u uslovima visokog sadržaja vode u izolacionom sistemu [28].

#### IX.4.2.2. Metode ispitivanja

Analiza sadržaja derivata furana rastvorenih u ulju vrši se metodom tečne hromatografije (HPLC), uzoraka ulja ekstrahovanih u acetonitrilu i analiziranih na C 18 reverzno faznoj koloni sa gradijentnim protokom mobilne faze voda – methanol 60 % – 40%, prema IEC 61198. Analiza stepena polimerizacije papira – DP vrši se viskozimetrijskom metodom, prema IEC 60450 standardu.

#### IX.4.2.3. Statistička analiza furana

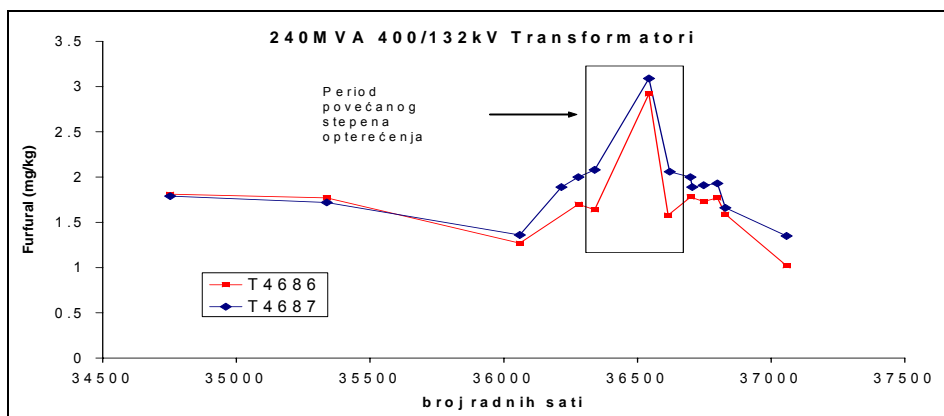
Ispitivanja jedinjenja furana u ulju energetskih transformatora analiza rezultata (slika 9), bili su osnova za uspostavljanje sopstvenih kriterijumi za tumačenje rezultata i definisanje periodike ispitivanja [21].



Slika 9. 2- FAL vrednosti kod transformatora u TE, HE i prenosnoj 110 kV mreži

Na osnovu analize baze podataka ispitivanja furana, može se zaključiti da je broj transformatora koji su malo ostareli i onih koji su umereno ostareli približno isti (40%),

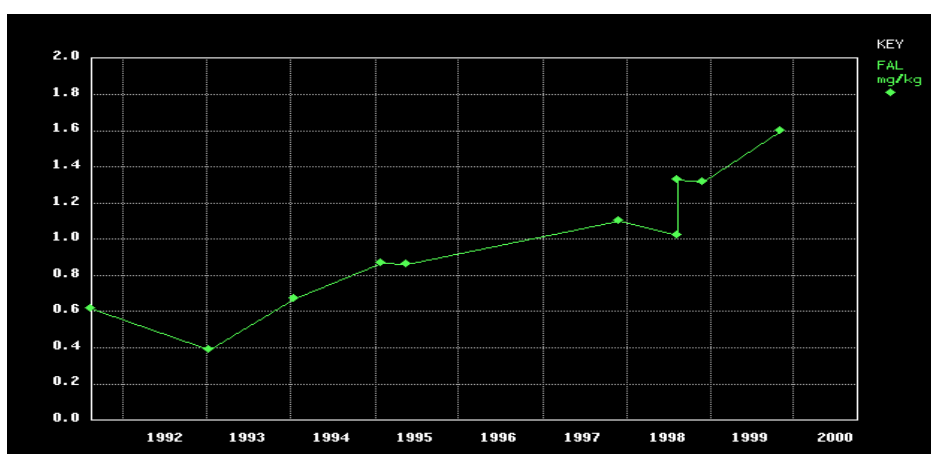
dok je relativno veliko učešće transformatora čija je čvrsta izolacija jako ostarela (10 % transformatora u intervalu od 1 do 5 mg/kg 2-FAL). Analizom baze podataka pojedinih grupa transformatora prema lokaciji (TE, HE i prenosna 220/110 kV mreža, slika 9.) utvrđeno je da je najveći broj transformatora sa jako ostarelom čvrstom izolacijom lociran u TE i 110 kV prenosnoj mreži, dok je kod transformatora u HE zastupljena malo do umereno ostarela celulozna izolacija [21]. Ovakav nalaz ukazuje na potrebu redovnog i učestanog praćenja transformatora analizom sadržaja derivata furana u ulju, zajedno sa GH analizom ulja [21,28].



*Slika 10. Promena koncentracije furfurala u ulju sa promenom stepena opterećenja*

Veoma je važno periodično pratiti promenu koncentracija furana da bi se stekao uvid u dinamiku procesa degradacije celulozne izolacije. Derivati furana kao jedinjenja čiji je ukupni sadržaj raspodeljen između tečne i čvrste izolacije zavisno od temperature i sadržaja vode migriraju iz papira u ulje i obrnuto u periodima promenljivog opterećenja i vlažnosti izolacionog sistema. Da bi se uočio trend promene koncentracija koji je posledica generisanja nove količine furana tj. degradacije celuloze potrebno je u određenim intervalima pratiti tokom dužeg perioda sadržaj furana u ulju.

Svaki transformator treba posmatrati pojedinačno u tumačenju rezultata analize furana zbog različite konstrukcije, vrste čvrste izolacije, režima rada i mesta transformatora u elektroenergetskom sistemu.



*Slika 11. Promena koncentracije furfurala sa godinama eksploatacije*

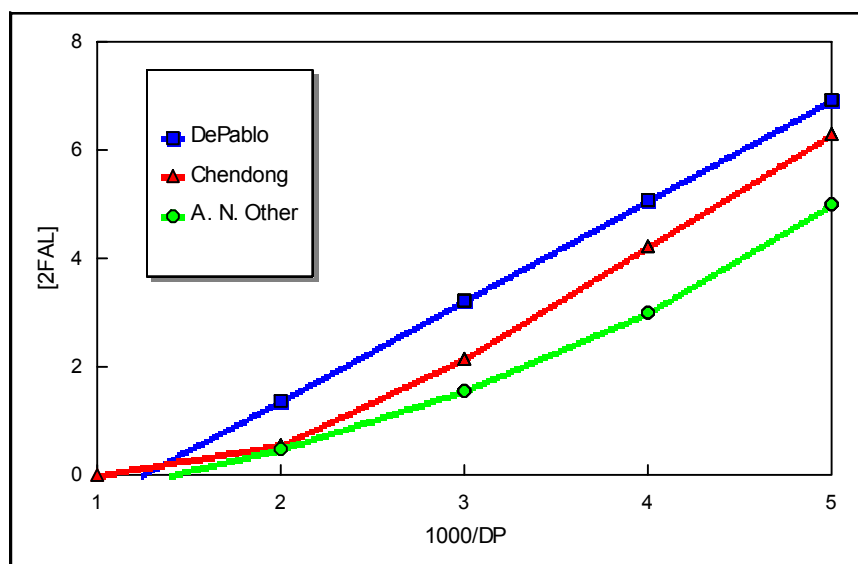
Opšte kategorije za ocenu stepena degradacije celuloze na osnovu analize furana postoje, ali samo kao okvir, dok je realna procena stanja i starosti čvrste izolacije moguća samo na osnovu praćenja linije trenda furana svakog pojedinačnog transformatora.

#### **IX.4.3. Veza između furana i stepena polimerizacije papira - DP**

Korelacije između sadržaja 2-furfurala i stepena polimerizacije celuloze - DP su u literaturi već niz godina predmet istraživanja, počev od logaritamskih funkcija koje su prvo dali Chendong [28], DePablo [29], pa potom korigovane relacije Pahlavanpour [31] koji je modifikovao korelaciju između Dp - 2-FAL na osnovu pretpostavke da je u transformatoru prisutno 20 % papira u unutrašnjim slojevima, uz bakarne namotaje koji degradira dva puta brže u odnosu na ostatak celulozne izolacije:

$$Dp = 800 / ((0.186x 2-FAL) + 1) \quad (4)$$

Ipak, deterministički pristup ne može da predstavi jednoznačnom vezom između stepena polimerizacije papira – Dp i koncentracije furana realno stanje čvrste izolacije. Pomenute dve veličine ne mogu se povezati jednoznačno jer je merenje Dp ograničeno prema lokaciji uzorkovanja zbog neuniformne raspodele molskih masa fragmentisanih polimernih celuloznih lanaca u funkciji geometrije sistema, dok je koncentracija furfurala rastvorena u ulju uniformna po celokupnoj zapremini, na čiji iznos utiču istovremeno nekoliko već pomenutih parametara: temperatura, sadržaj vode i hemijski sastav ulja. Proces starenja izolacionog papira tokom rada transformatora se odvija određenom brzinom zavisno od temperature, sadržaja vode, kiseonika i kiselih produkata u papirno-uljnom izolacionom sistemu. Kao krajnji radni vek izolacionog papira većina autora uzima vrednosti Dp od 200 do 250 koje odgovaraju mehaničkoj čvrstoći od oko 50% od početne vrednosti [28].



*Slika 12. veza između sadržaja furfurala i stepena polimerizacije- Dp*

Brzina reakcije raskidanja polimernih lanaca celuloze se može definisati kao:

$$1/D_{pt} - 1/D_{po} = kt, \quad (5)$$

gde je:

D<sub>po</sub> – početna vrednost D<sub>p</sub>

D<sub>pt</sub> – vrednost D<sub>p</sub> u datom vremenu

k – konstanta.

Koristeći Arenijus-ovu jednačinu za konstantu brzine hemijske reakcije,

$$k = A \exp(-E_a/(R \cdot T)) \quad (6)$$

gde je:

E<sub>a</sub> - energija aktivacije, kJ/mol, (vrednosti E<sub>a</sub> se kreću od 30 do 130 kJ/mol) [24]

R – gasna konstanta = 8.314 J/mol\*K

T- temperatura, K

A – konstanta koja zavisi od radnih uslova

Uzimajući da je D<sub>po</sub> = 1000 i D<sub>pt</sub> = 200 (na kraju životnog veka) i kombinujući jednačije (5) i (6), dobija se jednačina za procenjeni preostali životni vek čvrste izolacije – “termo kinetički model”[25]:

$$\text{životni vek} = 0.004/A \exp(13600/T), \text{ sati} \quad (7)$$

Procena životnog veka čvrste izolacije koristeći jednačinu (7) – “termo kinetički model” je u velikoj meri pojednostavljena kompleksna problematika procesa starenja izolacije, imajući u vidu da brzina procesa degradacije u velikoj meri zavisi od sadržaja vode u izolacionom sistemu, pri čemu se pri povišenom sadržaju vode u čvrstoj izolaciji menja brzina reakcije i mehanizam degradacije (konstanta u jednačini (7) bi bila manja u prisustvu većeg sadržaja vode u čvrstoj izolaciji). Uticaj vode na mehanizam i kinetiku reakcije kidanja celuloznih lanaca ističu Hohlein i saradnici kao glavnog promotera procesa degradacije celuloze, što je ilustrovano rezultatima veštačkog starenja [24,25,27]:

T = 95°C	D <sub>p</sub> = 800	sadržaj vode < 1 %
T = 95°C	D <sub>p</sub> = 600	sadržaj vode = 4 %

Utvrđeno je da su energije aktivacije – E<sub>a</sub> reakcije raskidanja celuloznih lanaca u velikoj meri zavise od sadržaja vode i čvrstoj izolaciji [5]:

E <sub>a</sub> = 86 kJ/mol	sadržaj vode < 1 %
E <sub>a</sub> = 37 kJ/mol	sadržaj vode = 4 %

U prisustvu povišenog sadržaja vode u celuloznoj izolaciji, energije aktivacije reakcije degradacije celuloze su daleko niže i skoro nezavisne od temperature (mala vrednost nagiba prave  $\ln k - 1/T$ , logaritama jednačine (6)). To praktično znači da u izolacionom sistemu sa visokim sadržajem vode celulozna izolacija podleže intenzivnoj degradaciji i na nižim temperaturama nezavisno od pojave termičkih ili električnih naprezanja u transformatoru.

Nejedly i Newesely navode kriterijume i granične vrednosti D<sub>p</sub> i preporuke za pogonsko stanje transformatora, rangiranih prema značaju u sistemu i naponskom nivou (tabela 3) [30].

*Tabela 3. Dp vrednosti-preporuke prema autorima: Nejedly i Newesely*

Dp	Stanje celuloze	Preporuke
> 1000	Neznatno ostarela	
1000 – 600	Malo ostarela	
600 – 400	Umereno ostarela	
400 – 250	Jako ostarela	Ne stavljati transf. pod napon / blok i trafoi u prenosnoj mreži
250 – 150	Izuzetno ostarela	Ne stavljati transf. pod napon / distributivni i sopstvene potrošnje u Elektranama
< 150	Ekstremno ostarela	Ne stavljati trafo pod napon

#### **IX.4.4. Kriterijumi i preporuke INT**

Hemijska laboratorija instituta “Nikola Tesla” rezultate ispitivanja čvrste izolacije pohranjuje u jedinstvenu bazu podataka, zajedno sa svim ostalim ispitivanjima. Na osnovu rezultata uporednih merenja 2-FAL i Dp uzoraka ulja i papira iz transformatora u pogonu koji su potom bili otvoreni radi inspekcije i remonta, kao i na osnovu statističke analize baze podataka merenja furana, hemijska laboratorija teži da definiše kriterijume za analizu i interpretaciju rezultata analize furana i Dp [18,19] uvodeći kategorije navedene u tabeli 4. Ključno pitanje je definisati kategorije za transformatore različite starosti i pratiti brzinu porasta sadržaja furana u ulju vremenom, što za svaki pojedinačni transformator predstavlja jedini pravi dijagnostički pristup u realnoj proceni starosti čvrste izolacije. Opsezi vrednosti 2-FAL, tj. navedene kategorije su samo okvirni kriterijum za definisanje grupacija starih, srednje ostarelih i jako ostarelih izolacionih sistema. Step en polimerizacije papira nije moguće izračunati korišćenjem jednačina (kao jed.4.). Neusaglašenost procenjenih, tj. izračunatih vrednosti Dp sa izmerenim vrednostima Dp potiče iz više razloga:

2-FAL se rastvara u ulju i nije moguće utvrditi lokaciju degardacije celuloze koja generiše 2-FAL.

Određivanje Dp je isključivo vezano za lokaciju uzorkovanja, pri čemu je raspodela Dp vrednosti neuniformna za različite tačke, zavisno od gradijenta temperature i raspodele vlage u izolacionom sistemu.

Mehanizam i kinetika procesa kidanja celuloznih lanaca se menja zavisno od prisutva vode u izolaciji i uticaja hidrolitičkog mehanizma degradacije celuloze [26].

Primer iz prakse može da ilustruje napred izneto. Slučaj transformatora kod koga su izvršena ispitivanja: 2-FAL = 1.80 i Dpsr (mereno)= 290 – 400 ukazuju da je izolacija jako ostarela (tabela 4.). Izračunavanjem Dp koristeći jednačinu (4), dobija se Dp proc. = 59, što ne odgovara realnom stanju čvrste izolacije.

*Tabela 4. Kriterijumi «INT» Furani, Dp i stanje celuloze*

Opsezi 2-FAL, ppm «INT»	stanje celuloze – «INT»	Opsezi Dp –«INT»
< 0.1	malo ostarela	> 800
0.1 – 1.0 (2.0)	umereno ostarela	800 - 400
> 1.0 (2.0)	jako ostarela	400 - 250
> 5.0	ekstremno ostarela	< 200

(transformatori sa više od 10 godina eksploatacije)

Istraživanje u oblasti modelovanja procesa hemizma degradacije celuloze uzimajući u obzir gradijent temperature po dužini suda, po dubini namotaja, uključujući ravnotežni sadržaj vode u izolacionom sistemu, je pravac u kome treba nastaviti rad u cilju realnijeg uvida u stanje i stepena ostarelosti čvrste izolacije.

#### **IX.4.5. Slučajevi iz prakse: gasna i tečna hromatografija kao kombinovan dijagnostički alat**



*Slika 13. Aktivni deo havarisanog transformatora – vertikalni zavrtnjevi magnetnog kola i namotaji*

*Slučaj I:* Transformator sopstvene potrošnje 35 MVA, 110/36.75/6.3 kV u termoelektrani. Usled kvara na 110 prekidaču 110 kV transformator je bio u kratkom spoju. Rezultati električnih merenja su ukazivali na normalno stanje. Kratak spoj i razvoj visoke temperature, što se videlo na osnovu istopljene boje na zidovima trafo suda, i sakupljeni gas u buholc releju upućivao je na intenzivnu degradaciju izolacionog sistema. Rezultati gasnohromatogafske analize i ispitivanja furana ukazali su na intenzivno razaranje čvrste izolacije transformatora. Ugljovodonični gasovi su bili samo prateća pojava visokih temeparatura, kao kombinacija termičkog i električnog kvara. Visoka proizvodnja ugljenmonoksida i ugljendioksida ukazala je na intenzivnu degradaciju celuloze, što je potvrdio veliki porast koncentracije furana u ulju u odnosu na prethodne rezultate analize furana. Na slici 15 jasno se vidi u kojoj meri je degradirana izolacija vertikalnih zavrtnjeva, dok izolacija namotaja “izgleda” veoma dobro. Nakon uzimanja uzoraka čvrste izolacije sa namotaja i izvršenih merenja stepena polimerizacije papira –Dp došlo se do zaključka da je celulozna izolacija namotaja takođe veoma degradirana.

*Tabela 5. Slučaj I: 35 MVA transformatora sopstvene potrošnje*

Date	H <sub>2</sub> ppm	CH <sub>4</sub> ppm	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ppm	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ppm	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> Ppm	CO ppm	CO <sub>2</sub> ppm	O <sub>2</sub> ppm	IEC šifra	2- FAL ppm
9/9/03	39	18	8	64	6	899	13146	11210	A	0.11*
6/2/04d.n.	923	1522	27	192	217	4869	23707	10982	120	1.80
6/2/04 g.n.	1004	1675	29	212	242	5225	26424	11480	120	1.72
6/2/04 g.b.r., %	1.776	0.673	0.002	0.013	0.010	10.271	2.786	11.50		/
Ce	888	2692	24	182	180	12325	27860	19553	121	

datum analize furana (2-FAL) je bio 12/2001

ppm: mg/kg

Rezultati ispitivanja uzoraka čvrste izolacije namotaja A, B i C sa različitim lokacija prikazani su u tabeli 6. Izolacioni papir je u velikoj meri degradiran, analizirajući rezultate svih izmerenih vrednosti stepena polimerizacije papira (Dp) sa namotaja A, B i C. Svi rezultati Dp su u zoni niskih vrednosti Dp od 400 do 296, kada se predviđa relativno kratak radni vek izolacije. Najniže Dp vrednosti ima papir sa namotaja „B“, što je očekivan rezultat, s obzirom na veliku struju koja je tekla kroz taj namotaj, pri čemu su razvijene visoke temperature uzrokovale intenzivnu degradaciju celuloze. Vizuelni pregled namotaja nije bio adekvatan realnom stanju utvrđenom nakon izvršenih merenja.

*Tabela 6. Slučaj I: Dp uzoraka natron papira sa 7 lokacija*

R.broj	Naziv uzorka	Dp
1	VN B	296
2	NN B	359
3	Terc. B	389
4	VN A	390
5	Terc. A	376
6	VN C	355
7	Terc.C	404

Rezultati 2 –FAL analize i Dp merenja su saglasni. Prema nima čvrsta izolacija pripada kategoriji «jako ostarele» izolacije. Iako je ovaj transformator u pogonu bio samo devet godina, njegova “realna starost” je daleko veća nakon opisanog incidenta. Preporučena je zamena namotaja zbog njihove loše mehaničke čvrstoće, na osnovu izmerenih niskih Dp vrednosti i velikog rizika za dalji pogon. Ovaj slučaj jasno ukazuje na neophodnost redovnog praćenja sadržaja furana u ulju da bismo imali jasniji uvid u realno stanje izolacije i njenu raspoloživost za eksploataciju i bili u mogućnosti da posledice incidentnih slučajeva definišemo na odgovarajući način.

*Slučaj II:* Transformator (15.75/235 kV 240 MVA) je u TE u pogonu od 1970. Nakon havarije 1994 godine od 1999 godine transformator je u pogonu sa novim aktivnim delom. Kvar na magnetnom kolu desio se 2001 godine, kada je izvršeno merenje koncentracije 2-FAL u ulju, na osnovu čega je ustanovljeno da je čvrsta izolacija u velikoj meri degradirana samo posle dve godine eksploatacije usled intenzivnog termičkog kvara (IEC šifra C 022, tabela 5). Gasnohromatografska analiza (GH) nije ukazala na pojavu intenzivne degradacije celuloze, na osnovu izmerenih koncentracija ugljenmonoksida i ugljendioksida, što potvrđuje već ustanovljenu

činjenicu da GH analiza ulja nije adekvantna dijagnostička metoda za ocenu stanja čvrste izolacije [21].

*Slučaj III* (15/407 kV) je u TE u pogonu je od 1979 godine. Nalazi se u normalnom radnom režimu, IEC šifra - A. 2-FAL analiza ukazala je na intenzivnu degradaciju celuloze, za razliku od GH analize ulja (koncentracije CO i CO<sub>2</sub> su u okviru »normalnih«, tabela 7 ), što navodi na zaključak da GH i 2-FAL analiza samo primenjene zajedno predstavljaju pravi dijagnostički alat za ocenu pogonskog stanja transformatora.

*Slučaj IV* (6.3/36.76 kV, 4 MVA) je u HE u pogonu od 1974 godine. Rezultati gasnohromatografske analize su ukazivali na normalno radno stanje transformatora (IEC šifra A). U ulju je izmeren povišen sadržaj vode od 33 ppm, što je odmah bila indikacija intenzivne degradacije celuloze, uzimajući u obzir i godine eksploatacije. Izmerena vrednosti 2-FAL od 5.34 ppm potvrdila je pretpostavljeno (tabela 7). Transformator se nalazi u kritičnom stanju po pitanju dalje upotrebljivosti celulozne izolacije i pripada kategoriji transformatora sa »ekstremno ostarelom« čvrstom izolacijom za koje se ne preporučuje stavljanje pod napon (tabela 4 i 5). Ovaj primer jasno ilustruje uticaj povišenog sadržaja vode u izolacionom sistemu na promenu kinetike degradacije celuloze, koja je u tim uslovima u maloj meri zavisna od temperature (transformator je u normalnom radnom režimu sa niskim radnim temperaturama od 23OC) [31].

*Tabela 7. Slučajevi II, III i IV – Sadržaj gasova i 2-FAL rastvorenih u ulju*

datum	H <sub>2</sub> ppm	CH <sub>4</sub> ppm	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> ppm	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> ppm	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> ppm	CO ppm	CO <sub>2</sub> ppm	Broj godina pogona	IEC šifra	2- FAL ppm
II /05/01	32	324	0	917	273	400	3628	2	C 022	3.63
II /06/01	789	1483	28	3061	611	693	5253		C 022	/
III 19 /03/04	27	25	0	7	7	925	3934	25	A	1.42
IV 09/04	26	12	0	21	3	696	14064	30	A	5.34

ppm: mg/kg

## **IX.5. ZAKLJUČAK**

Instrumentalne metode analitičke hemije u velikoj meri su doprinele razvoju dijagnostike pogonskog stanja i poboljšanju procene realnog stanja, upotrebljivosti i stepena degradacije izolacionog sistema transformatora. Gasna hromatografija primenjena skoro 4 decenije u analizi pogonske ispravnosti mernih i energetskih transformatora veliki broj puta je opravdala postojeći renome jedne od najmoćnijih dijagnostičkih metoda. Njenu nadgradnju danas čine rezultati statističke analize velike baze podataka, uspostavljanje normi i parametara koji predstavljaju rane preventivne signale koji ukazuju na pogonsku ispravnost električne opreme. Rana preventiva u dijagnostici stanja transformatora ima veliki značaj u planiranju sistema, oceni pouzdanosti i raspoloživosti opreme, što ima posebno veliki ekonomski značaj. U ovom radu, uz pregled istorijata i interesantnih slučajeva iz prakse poseban akcenat je bio stavljen na statističku analizu baze podataka gasnohromatografskih ispitivanja i metodologiju ocene pogonske ispravnosti transformatora. Kriterijumi i granične vrednosti pojedinačnih »gasova kvara« hemijske laboratorije Instituta predstavljaju plod višedecenijskog rada, uz modernizovan koncept tumačenja rezultata korišćenjem

statističke analize, pouzdanost dijagnostike i procene kvarova u transformatorima se dovodi na viši nivo. Rezultati statističke analize baze podataka gasnrohromatografskih ispitivanja ukazuju da se najveći broj oko 87 % energetskih transformatora Srbije i Crne Gore nalazi u ispravnom pogonskom stanju.

Nove analitičke metode – infracrvena spektrofotometrija (IR) i tečna hromatografija (HPLC) našle su značajnu primenu u redovnoj preventivnoj kontroli transformatora, posebno sa aspekta analize stanja, stepena degradacije i upotrebljivosti papirno-uljne izolacije transformatora i čine nadgradnju na dosadašnji koncept održavanja. Analizom derivata furana u ulju metodom tečne hromatografije (HPLC) moguće je kod transformatora u pogonu pratiti brzinu degradacije celulozne izolacije. Meru stepena degradacije celulozne izolacije predstavlja stepen polimerizacije papira – Dp, koji je obrnuto proporcionalan sadržaju jedinjenja furana u ulju. Jednoznačne veze između Dp i furana nije moguće uspostaviti, pa se procena «realne starosti» čvrste izolacije transformatora u pogonu i njene mehaničke čvrstoće može izvršiti samo praćenjem promene koncentracija furana sa vremenom u definisanim periodima većih opterećenja uz rezultate ispitivanja fizičkih, hemijskih, električnih karakteristika ulja i gasnrohromatografsku analizu. Na ovaj način može se sa većom pouzdanošću proceniti pogonsko stanje, raspoloživost i starost aktivnog dela transformatora. Najveći broj transformatora sa jako ostarelom čvrstom izolacijom lociran u TE i 110 kV prenosnoj mreži, dok je kod transformatora u HE zastupljena malo do umereno ostarela celulozna izolacija [2].

Analiza stepena polimerizacije – Dp je metoda koju treba koristiti u slučajevima kada je kod remontovanih ili havarisanih transformatora neophodno proceniti dalju pogonsku raspoloživost i upotrebljivost čvrste izolacije. Preporučuje se uzorkovanje čvrste izolacije sa ukoliko je moguće više ključnih lokacija, i to po visini namotaja i radijalno u cilju adekvatne procene stanja čvrste izolacije, ocene njene dalje upotrebljivosti i adekvatnog planiranja eksploatacije transformatora.

## LITERATURA

- [1] J.Lukić, V.Rajaković, "Impact of Particles in Insulating Oils On Working Ability of Power Transformers", Hun-Pra-Partec, 625th Event of The European Federation of Chemical engineers, Budapest 21-24 avg. 2001.
- [2] L.Pettersson, Life Assessment: Ranking of Power Transformers Using Condition Based Evaluation. A New Approach, 12-204, CIGRE Session 1998.
- [3] V.Pejović, Hemija u Elektroenergetici – Transformatorska ulja, Elektrotehnički institut "Nikola Tesla", Beograd, Maj 2005.
- [4] F.Mosinski, T.Piotrowski, New Statistical Methods for Evaluation of DGA Data, IEEE Transactions on Dielectric and Electrical Insulation, vol 10, No.2, April 2003.
- [5] Pejović V., Bojković A. "Iskustva Instituta "Nikola Tesla" sa kontrolom transformatora u pogonu pomoću gasne hromatografije", XIII CIGRE, Bled, 1977.
- [6] Pejović V., Bojković A. "Kontrola transformatora analizom gasova, hromatografska ispitivanja", studija Instituta "Nikola Tesla" br. 477, Beograd, 1977.
- [7] Pejović V., Milivojević J., Đurđević K. "Ispitivanje transformatorskih ulja infracrvenom spektrofotometrijom", studija Instituta "Nikola Tesla", br. 480296, Beograd, 1980.
- [8] Thibault M. "Moyens physico-chimiques d'etude du vieillissement des huiles", RGE,1968

- [9] Thibault M. Rabaud Y. "Application de l'analyse de gaz disso a la maintenance des transformateurs", Bulten d'information, LCIE, N°93, 1975
- [10] Bouver B. Nouveaux criteres pour caracteriser la degradation thermique d'une isolation a base de papier, RGE, Tome 79, N°6, 1970
- [11] Dornenburg E., Schober J. "Determination and Analysis of Gases Formed in Transforms Evaluation of Gas Analysis Results", predlog za WG 15-01, CIGRE, 1972
- [12] Rogers R.R., Davies I. Robinson K., Shanks C. "CEGB experiena of the analysis of dissolved of gas in transformer oil for the detection of incipient faults", predlog za WG 15-01 CIGRE, 1972.
- [13] Davies I., Burton R.Y. "A review of the methods for interpreting the analysis of dissolved gases in insulating oil", CEGB, SSD/SE/SR 110, 1972
- [14] 10/418/CDV/1997: Draff IEC 60599 ED. 2.0: "Mineral oil-impregnated equipment in service-interpretation of dissolved and free gases analysis"
- [15] K.Drakić, J.Lukić A. Popović, S. Gavrančić, Primena instrumentalnih dijagnostičkih metoda za otkrivanje parcijalnih pražnjenja u cilju produžetka radnog veka transformatora JUKO CIGRE, Zlatibor, 29.05.- 3.06. 2005.
- [16] T.V.Oommen, R.A. Ronnau, R.S. Girgis, "New Mechanism of Moderate Hydrogen Gas Generation In Oil-Filled Transformers", 12-206, CIGRE Session 1998.
- [17] S.Gavrančić, J.Lukić, K.Drakić, "Infracrvena spektrofotometrijska analiza hemijskog sastava izolacionog ulja i uticaj na primenske osobine tečnog dielektrika" JUKO CIGRE, Zlatibor, 29.05.- 3.06. 2005.
- [18] Jelena Lukić, Aleksandar Orlović, Michael Spitteller, Jovan Jovanović, Dejan Skala "Rerefining of Waste Mineral Insulating Oil By Extraction With N-Methyl-2-Pyrrolidone", Separation And Purification Technology, (in press, accepted on 19 th of december 2005).
- [19] J.Lukić, A.Orlović, D.Skala, J.Jovanović, "Assesment of Waste Insulating Oil Rerefining By Eextraction with N-Methyl-2-Pyrrolidone Regarding Oxidtaion Stabilty And Polycyclic Aromatic Hydrocarbon Content", The Sixth European Meeting on Environmental Chemistry, 6-10 December 2005.
- [20] J.Lukić et al, "Monitoring the insulating paper degradation with high performance liqiud chromatography determination of furan compounds", JUKO CIRED, regionalno savetovanje o elektrodistributivnim mrežama, 5-8 Oktobar 2004.
- [21] J.Lukić, A.Bojković, S.Gavrančić, K.Drakić, J.Jovanović. D.Teslić, "Dijagnostika pogonskog stanja čvrste izolacije transformatora analizom derivata furana i stepena polimerizacije papira", JUKO CIGRE, Zlatibor, 29.05.- 3.06. 2005.
- [22] T.K.Saha, P.Purkait, "Investigation of Polarization and Depolarozation Current Measurements for the Assessment of Oil-Paper Insulation of Aged Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and electrical Insuation vol.11, No 1, February 2004.
- [23] G.Csepes, 1998, "Correlation Between Electrical And Chemical Testing Techniques For Assesing Degradation of Oil-Paper Insulation", "CIGRE Session", "15-202", 67.
- [24] B.V.Vanin, "Moisture Duffusion and Equilibrium in View of Interfacial Adsorption Water Vapor by cellulose in Insulation Microcapillaries", 15-204, CIGRE Session 2000.

- [25] T.Leibfried, "Ageing and Moisture Analysis of Power Transformers Insulation Systems", 12-101, CIGRe Session 2002.
- [26] J.Lukić, V.Rajakovic, K.Drakic "Transformer Oil Furan Compound Analysis In Evaluation Of Power Transforemrs Age", 16th International Congress of Chemical and Process Engineering, Prague, 22-27.08.2004.
- [27] I. Hohlein, A.J.Kachler, "Progress In Transformer Ageing Research. Impact Of Moisture On DP Of Solid Insulation And Furane Development In Oil At Transformer Service Temperatures", D1-309 CIGRE Session 2004.
- [28] Chendong, "Monitoring Paper Insulation Aging By Measuring Furfural Contents In Oil", 7th International Sympoisium On High Voltage Engineering, August 1991.
- [29] A.De Pablo, B.Pahlavanpour, Cigre Task Force 15.01.03, "Furanic Comp. Analysis", Electra No. 175, December 1997.
- [30] Nejedly, Newesely, "Evaluation Of The Extent Of Ageing Of Paper In Oil-Immersed Power Transformers", D1-302, CIGRE Session 2004.
- [31] T.K.Saha, "Review of Modern Diagnostic Techniques for Assessing Insulation Condition in Aged Transformers", IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol 10, no.5 October 2003.

U dugogodišnjem istraživanju učestvovali su: (mr.Jelena Lukić, dipl.ing., Velinka Pejović, dipl.hem., Ksenija Drakić, dipl.hem.), Aleksandar Bojković, dipl.ing., Jovan Milivojević, dipl.fiz., Slađana Teslić, dipl.ing., Đorđe Jovanović, dipl.ing., Vladana Rajaković, dipl.ing., Snežana Kovačević, hem.tehn., Dragan Teslić, dipl.ing., Marjan Stojković, dipl.hem., Dragan Jovanović, el.tehn., Vladimir Ivančević, hem.tehn..

Spoljni saradnici - istraživači:

Naučni radnici sa Tehnološko-metalurškog fakulteta u Beogradu, katedre za Organsku Hemijsku Tehnologiju,

Inženjeri kolege iz Elektroistoka, sadašnje Elektromreže Srbije,

Naučni saradnici: Žaklina Tasić, dipl.fiz.hem. i Snežana Sremac, dipl.fiz.hem. iz instituta za nuklearne nauke »VINČA«.

#### **REWIEV OF INSULATING OIL ANALYSIS IN POWER TRANSFORMERS ASSET CONDITION MONITORING**

*In this chapter a rewiev of instrumental insulating oil analysis has been presented, as a very important part of transformers asset condition monitoring. Dissolved gas analysis as main diagnostic tool in evaluation of power transformers working condition is applied for now more that 35 years. This study was focused on statistical analysis of large data base and definition of preventive coefficients for secure and reliable function of electrical equipment. Life cycle analysis and risk assessment is nowadays very important issue to be considered in evaluation of in service availability. Maintenance concept and asset condition monitoring is based on stastistical approach and use of different analytical techniques as combined diagnostic tool. Together with DGA application, use of high performance liquid chromatography (HPLC) and infra red spectrophotometry (IR) as combined tool in periodic analysis is discussed and its benefits showed through several case studies. Special emphasis was placed on solid insulation ageing and evaluation of aging condition. Chemistry of cellulose degradation is presented, together with short analytical method description. Factors influencing thermodynamics and equilibrium of furan compounds distributed between oil and paper*

*is discussed. Correlation between 2-FAL content and years of transformers service was determined in order to evaluate the transformers age. Through some cases of transformers from power plants, the importance of 2-FAL analysis is emphasized. Together with dissolved gas analysis (DGA), electrical, physical and chemical measurements, furan compound analysis is improving maintenance program of power transformers. Measurement of degree of polimerization – DP of transformers out of service, during repair and other maintenance actions is giving the important information to the owner of equipment about mechanical strength of the cellulosic paper. On the basis of DP value, more precise set of DP values, degree of paper degradation can be determined and availability and reliability of transformer evaluated. All these mentioned analysis are the basis of modern transformer condition assessment program an are very important in transformer life management system.*