

FENOMEN GASIRANJA ULJA U DIJAGNOSTICI ENERGETSKIH TRANSFORMATORA

Branka ĐURIĆ, Elektrotehnički institut Nikola Tesla Beograd, Koste Glavinića 8a, Beograd, Srbija¹
Vesna Radin¹
Jelena Lukić¹

KRATAK SADRŽAJ

Dijagnostika pogonskog stanja transformatora gasnohromatografskom analizom može biti otežana pojavom gasiranja ulja (eng. „stray gassing”). Fenomen gasiranja ulja predstavlja afinitet ulja ka stvaranju vodonika i lakih ugljovodonika (najčešće metana i etana) u nižem temperaturnom opsegu, < 200 °C. U nekim situacijama gasiranje ulja se teško može razlikovati od niskotemperaturnih termičkih kvarova ili parcijalnih pražnjenja u transformatoru, iako postoje unapređene metode za interpretaciju analize sadržaja gasova (Duvalovi trouglovi, pentagram i dr.). Ipak, nakon analize sadržaja gasova rastvorenih u ulju transformatora iz pogona, laboratorijskim testovima se može dokazati postojanje gasiranja ulja. U radu su opisani fenomeni gasiranja ulja, kao i alati za interpretaciju gasiranja ulja transformatora. Kod nekoliko distributivnih transformatora, kod kojih je redovnom kontrolom dijagnostikovano gasiranje ulja, urađeni su uporedni laboratorijski testovi ulja (CIGRE TB 296 i novi test preporučen od strane CIGRE WG D1.70). Zbog prisutnih problema u svakodnevnoj dijagnostici postoji značajna zainteresovanost stručne javnosti za ovu pojavu prikazani su novi pravci u testiranju ulja na gasiranje i tendencija uvođenja testa gasiranja ulja u osnovni set prijemnog ispitivanja novih ulja kroz reviziju standarda IEC 60296.

Ključne reči: energetski transformator, gasnohromatografska analiza, gasiranje ulja, stray gassing, dijagnostika, transformatorsko ulje

STRAY GASSING PHENOMENON IN POWER TRANSFORMER DIAGNOSTICS

SUMMARY

Power transformer condition assessment can be a bit more difficult using dissolved gas analysis (DGA) as a diagnostic tool, if stray gassing phenomenon occurs. Stray gassing is oil ability to form fault gases like hydrogen and lower hydrocarbons (methane and ethane usually) at relatively low temperature range, < 200 °C, which is temperature typical for low temperature thermal faults or partial discharges. In case of suspicion, stray gassing can be easily proven with simple laboratory test. This paper describes stray gassing phenomenon and diagnostic tools available for interpretation. Comparative DGA results of oils from service and laboratory stray gassing tests (CIGRE TB 296 stray gassing and new stray gassing test proposed by CIGRE WG D1.70) has been given. There has been a significant interest of professional community and in power transformer industry for stray gassing test to be included in set of acceptance test for new unused oils in order to provide better transformer condition assessment.

Key words: power transformer, dissolved gas analysis, DGA, stray gassing, diagnostic, transformer oil

branka.djuric@ieent.org
011/3952072

UVOD

Praćenje pogonskog stanja i otkrivanje kvarova kod energetskih transformatora pomoću analize sadržaja gasova u ulju široko je rasprostranjena metoda već dugi niz godina. Dobro su poznati mehanizmi nastajanja gasova u ulju transformatora u slučaju normalnog rada ili u uslovima termičkih ili električnih kvarova. Iako je analiza gasova koji se ekstrahuju iz uzorka ulja transformatora kompleksna, na osnovu sadržaja gasova u ulju, odnosa gasova, porasta i prethodnih analiza može se doći do zaključaka o stanju transformatora. Ipak, u poslednjih 15 godina stručna javnost (proizvođači transformatora i ulja, istraživači, vlasnici transformatora, ispitivači, autori naučnih radova) postala je zainteresovana za „novi” fenomen zapažen u praksi (1): gasovi u ulju transformatora mogu nastati i na niskim temperaturama, bez postojanja kvara ili nepravilnog rada. Prema CIGRE brošuri br. 296 iz 2006. godine ovakav neočekivani nastanak gasova nekoliko autora je prijavilo još 1998. godine. Fenomen je nazvan „stray gassing” (eng.) i definisan kao „nastajanje gasova iz izolacionih mineralnih ulja na relativno niskim temperaturama (90-200 °C)” (2).

FENOMEN GASIRANJA ULJA

Gasiranje ulja (eng. stray gassing) predstavlja nastanak gasova vodonika (H_2), lakih ugljovodonika metana (CH_4), etana (C_2H_6) i/ili ugljenmonoksida (CO) i ugljendioksida (CO_2) u ulju, na umerenim temperaturama tj. pri normalnim operativnim uslovima rada transformatora, a da pri tome ne postoji kvar u transformatoru. Ovakvo ponašanje ulja primećeno je i kod novih transformatora i kod transformatora koji nikada nisu bili u pogonu (3). Paralelno sa nastajanjem gasova dolazi do snižavanja koncentracije kiseonika (O_2) u ulju više nego što je očekivano iako je u pitanju transformator sa vazдушnim disanjem. To znači da je gasiranje ulja temperaturno zavisian proces oksidacije ulja, uz katalitički uticaj materijala koji se nalaze u transformatoru. Primećeno je da gasiranje ulja zavisi i od vrste i sastava ulja tj. kod slabo rafinisanih ulja, pasiviranih ulja i kod neinhibiranih ulja češća je pojava izdvajanja veće količine gasova. Takođe, što je manja oksidaciona stabilnost ulja to je veća produkcija gasova i obrnuto. U standardu za ispitivanje nekorišćenih mineralnih izolacionih ulja IEC 60296:2012 navodi se da je kod inhibiranih ulja manja produkcija gasova nego kod neinhibiranih (4).

U praksi je razvijeno nekoliko laboratorijskih testova kojima se može otkriti i potvrditi postojanje gasiranja ulja, kako kod novih nekorišćenih ulja tako i kod ulja iz pogona. Dati testovi su samo naizgled isti ali se dobijeni rezultati mogu razlikovati usled zadatih početnih uslova. U zavisnosti od odabranog testa uslovi pod kojima se ispituje ulje se razlikuju i to prema načinu pripreme ulja, sadržaju kiseonika u ulju, temperaturi, vremenu izvođenja, prisustvu ili odustvu bakra kao katalizatora degradacije ulja. Jedini standardizovani test je ASTM D7150 prvi put izdat 2005. godine i revidiran 2013. godine (5). Drugi test je predložen u CIGRE brošuri br. 296 koja je izdata 2006. godine (2) i neznatno je modifikovan u odnosu na ASTM test. U Laboratoriji za ispitivanje izolacionog ulja i papira instituta Nikola Tesla Beograd u toku je *Round Robin* test za ispitivanje gasiranja ulja pod revidiranim uslovima koji se razlikuju od prethodno datih testova. Ovaj novi test preporučen je od strane CIGRE radne grupe D1.70 koja se bavi revizijom standarda za ispitivanje novih ulja IEC 60296.

ASTM D7150 test. Uzorak transformatorskog ulja se prvo filtrira, a zatim se kroz ulje upušta vazduh ili azot u trajanju od 30 minuta, kako bi se ulje zasitilo ovim gasovima. Vazduh pospešuje gasiranje tj. oksidaciju ulja, a azot je uveden da se analizira pojava gasiranja ulja pod dejstvom bakra, bez prisustva kiseonika. Ovako pripremljen uzorak se prebacuje u stakleni gas-nepropusni špric i greje u pećnici 164 sata na temperaturi od 120 °C. Nakon završetka testa špric sa uzorkom se hladi i na ulju se izvodi analiza sadržaja gasova nastalih u ulju.

CIGRE brošura br. 296 test. Ovaj test je varijacija ASTM testa, a razlika je u tome što se ulja greju u različitim vremenskim periodama i osim ispitivanja na 120 °C dodato je i ispitivanje ulja na 200 °C. Uzorak ulja se prvo degazira pod vakuumom kako bi se uklonili svi gasovi iz ulja. Zatim se kroz ulje upušta vazduh ili azot, kako bi se ulje zasitilo ovim gasovima. Iz ovog ulja se ispituje sadržaj gasova za slepu probu. Dalje, pripremljeno ulje se odvaja na tri dela, u tri šprica, i smešta u pećnicu, na temperaturu od 120 °C. Prvi špric se vadi i pećnice nakon 16 sati (16 h) i nakon hlađenja se ispituje sadržaj gasova. Drugi špric se vadi nakon 164 sata (164 h) i ispituje se sadržaj nastalih gasova. Treći uzorak se takođe vadi iz pećnice nakon 164 sata, zatim se ulje degazira, zasiti se kiseonikom ili azotom, kao na početku testa, i ponovo se testira na 120 °C još 16 sati (16 h+16 h). Na kraju se iz ovog uzorka ispituje sadržaj gasova kako bi se utvrdilo da li ima povratnog gasiranja nakon grejanja uzorka.

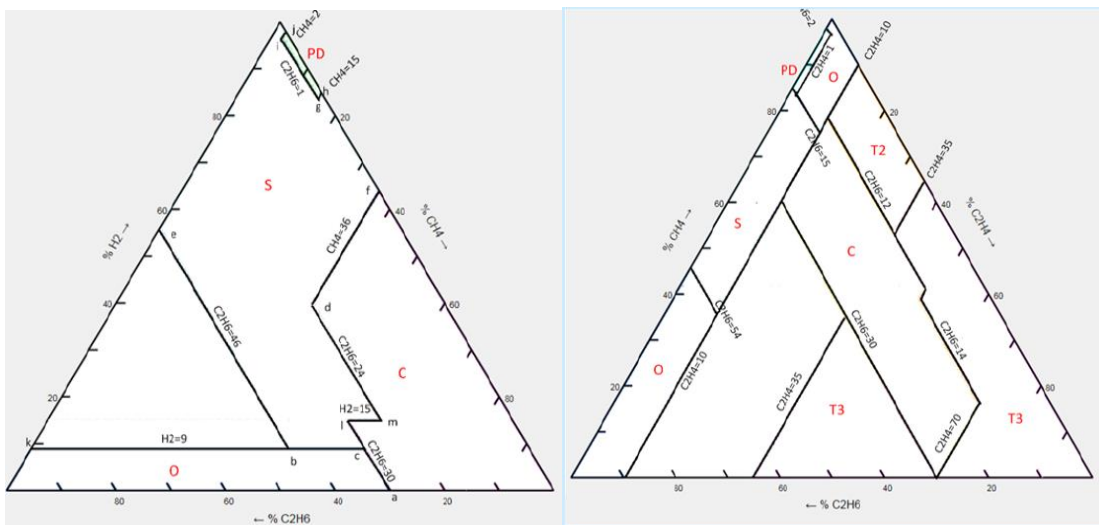
Ista procedura pripreme uzoraka i periode ispitivanja su date i za ispitivanje ulja na temperaturi od 200 °C. Procedura ispitivanja ulja na 200 °C data je kako bi se utvrdilo kako gasiranje ulja utiče na analizu sadržaja gasova rastvorenih u ulju na temperaturama bližim toploj tački kvara u transformatora.

CIGRE WG D1.70 test. U ovom testu date su značajnije izmene uslova pod kojima se ispituje ulje. Temperatura testa je 105 °C, što je približnije realnim temperaturama rada transformatora. Niža temperatura je uvedena kako bi se napravila razlika između niskotemperaturnih kvarova (> 120 °C, šifra T1) i gasiranja ulja, kao i da bi se distanciralo od zone intenzivne degradacije papira (> 105 °C). Paralelno se ispituju uzorci sa i bez dodatka bakra čija količina odgovara odnosu 0,16-0,20 bakra prema ulju. Cilj je bio da se ispita katalitički uticaj bakra na degradaciju ulja i afinitet ulja da pravi gasove. Vreme ispitivanja je skraćeno na 48 sati.

Predtretman ulja zahteva uvođenje vazduha ili azota 15 minuta. Iz ovog ulja se ispituje sadržaj gasova za slepu probu. Pripremljena količina ulja se podeli u dva dela. U jedan uzorak je dodaje bakarna pločica površine (9,6-10) cm², a u drugi uzorak ne. Uzorci se greju u pećnici 48 sati na temperaturi 105 °C. Nakon završetka testa uzorci se hlade i ulje se ispituje gasnom hromatografijom.

INTERPRETACIJA

Svakodnevna analiza sadržaja gasova rastvorenih u ulju transformatora u pogonu, koja se sprovodi u cilju dijagnostike stanja transformatora, i interpretacija rezultata može biti otežana ukoliko postoji gasiranje ulja. Degradacijom ulja, u uslovima parcijalnih pražnjenja u transformatoru, prvenstveno nastaju gasovi vodonik, metan i etan (prema standardu IEC 60599 dobija se šifra kvara PD). Međutim, u standardu za interpretaciju analize sadržaja gasova IEC 60599 se navodi da se isti obrazac degradacije ulja dešava i u slučaju gasiranja ulja (6). Zato je u poslednjih deset godina razvijeno nekoliko novih metoda interpretacije rezultata sadržaja gasova kako bi se olakšalo tumačenje rezultata. Mišel Duval je 2008. godine u IEEE magazinu objavio reviziju svojih trouglova (7). Pored „klasičnog” trougla 1 (sa gasovima metan, etilen i acetilen) za interpretaciju kvarova od nisko-temperaturnih (T1 i PD) do električnih kvarova velike energije (D2), uvodi trouglove 4 i 5, koji su prerađeni 2012. godine (slika 1). Duvalov trougao 4 koristi gasove vodonik, metan i etan koji nastaju pri električnim kvarovima male energije ili na nižim temperaturama. Koristi se nakon identifikacije kvara u trouglu 1 kao niskotemperaturni kvar sa šiframa PD, T1 ili T2, kao i u slučaju visoke koncentracije vodonika. Trougao 4 ima „nove” podzone: zona S – gasiranje ulja na temperaturi < 200 °C, zona O – pregrevanje na temperaturi < 250 °C bez karbonizacije papira, zona C – moguća karbonizacija papira na temperaturi > 300 °C (i to u 80 % slučajeva).

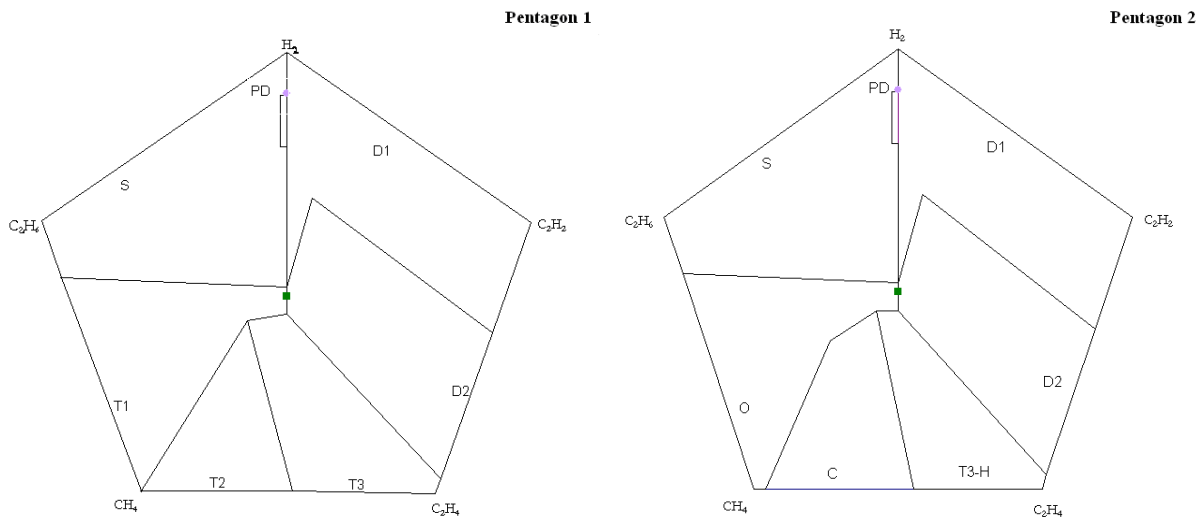


SLIKA 1 - Duvalov trougao 4 (levo) i trougao 5 (desno) (7)

Duvalov trougao 5 koristi gasove metan, etilen i etan koji nastaju pri kvarovima sa višim temperaturama, kako bi se došlo do više informacija o termičkim kvarovima koji obuhvataju papirnu izolaciju i ulje. Koristi se nakon identifikacije kvara u trouglu 1 kao visokotemperaturni kvar sa šiframa T2 ili T3. Trougao 5 ima zone: T2 –

temperatura tople tačke u ulju > 300 °C, zona T3 – temperatura tople tačke u ulju > 700 °C, zona C – moguća karbonizacija papira (u 90 % slučajeva). Za zone O, S i PD autori preporučuju korišćenje trougla 4.

Najnovija metoda tumačenja rezultata sadržaja gasova iz ulja transformatora je „Duvalov pentagon” i objavljena je 2014 godine (8). Ova metoda uzima u obzir 5 gasova kvara: vodonik (H_2), metan (CH_4), etan (C_2H_6), etilen (C_2H_4) i acetilen (C_2H_2). Na slici 2. predstavljen je Duvalov pentagon 1 koji obuhvata osnovne termičke i električne kvarove (PD, D1, D2, T1, T2, T3), uz dodatak zone S za gasiranje ulja. Pentagon 2 takođe ima zonu za gasiranje ulja (S gasiranje ulja na temperaturi 120 °C i 200 °C) čije su koordinate dobijene na osnovu laboratorijskih testova. Date su i zone za električne kvarove (PD, D1 i D2) i unapređene zone za termičke kvarove koje su korišćene u Duvalovim trouglovima 4 i 5: T3-H (termički kvar sa zagrevanjem ulja), C (termički kvar T3-C, T2-C, T1-C sa karbonizacijom papira), O (pregrevanje na temperaturi < 250 °C). Pentagone 1 i 2 treba koristiti kao dopunski alat u sagledavanju stanja transformatora, a mogu se upotrebljavati u kombinaciji sa trouglovima 1, 4 i 5, ali i samostalno. Pomoću pentagona 1 i 2 može se napraviti razlika između kvarova koje nisu zabrinjavajući za opremu, kao što su termički kvar u ulju ili gasiranje ulja, od onih kvarova koji su potencijalno opasni za sam transformator (npr. karbonizacija papira).



SLIKA 2 - Duvalov pentagon 1 (levo) i pentagon 2 (desno) (8)

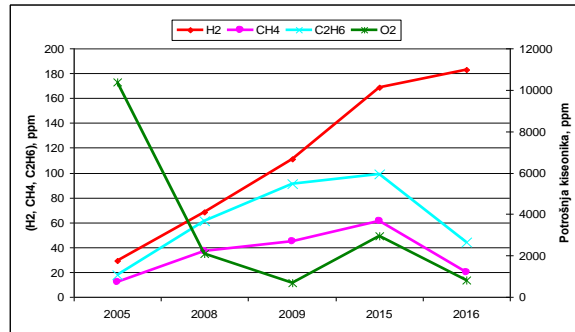
PRIMERI IZ PRAKSE I TESTOVI U LABORATORIJI

Primer 1. U tabeli 1. je prikazan istorijat rada distributivnog transformatora 35/10 kV, 8 MVA, 13 godina u pogonu, kroz ispitivanja sadržaja gasova u ulju. Posmatranjem promena koncentracija gasova vodonika, etana i metana (Tabela 1) uočava se njihov karakterističan porast kroz godine pogona. Porast koncentracije vodonika prati i snižena koncentracija kiseonika što je znak povećane oksidacije ulja na radnim temperaturama. Pored vodonika, u nižem koncentracionom opsegu se pojavljuju metan i etan kao prateći gasovi. Ispitivanjem fizičkih, hemijskih i električnih karakteristika ulja utvrđeno je da je u pitanju malo ostarelo ulje. Ulje ne sadrži inhibitor oksidacije, a sadržaj aromata je 17,8 %, što upućuje na niži stepen rafinacije i lakšu oksidaciju ulja. Prema karakteristikama ulja znaci oksidacije ne moraju biti izraženi (kada se još uvek nisu stvorili polarni i kiseli produkti starenja ulja u dovoljnoj količini) ali se početna faza oksidacije vidi po pojavi gasiranja ulja.

TABELA 1 - Sadržaj gasova (ppm) u ulju iz pogona i grafički prikaz promene koncentracija

Godina	H_2	CH_4	C_2H_4	C_2H_6	CO	O_2
2005	29	12	4	18	270	10371
2008	68	37	8	61	198	2084
2009	111	45	8	91	199	701
2013	102	58	10	142	288	5850

2014	247	28	7	80	371	405
2015	169	61	9	99	425	2944
2016	183	20	5	44	278	809



Analizom drugih transformatora istog proizvođača (Transformatori Eletrici) i istih karakteristika (napon, snaga) takođe se uočava povećan nastanak vodonika i snižena koncentracija kiseonika (povećana oksidacija). Ova činjenica može da ukaže na konstrukcione nedostatke, kao što su upotreba određene vrste ulja i/ili drugih specifičnih metala i materijala koji izazivaju povećano generisanje vodonika i izraženiju oksidaciju ulja. Korišćenjem Duvalovog trougla 4 i pentagona 1 dolazi se do šifre gasiranja ulja (slika 3). U cilju potvrde rezultata merenja, u laboratoriji je zatim sproveden niz eksperimenata koji će pokazati da li se radi o gasiranju ulja. Uzorak ulja transformatora je paralelno podvrgnut dostupnim testovima gasiranja ulja (CIGRE Brošura 296, CIGRE radna grupa D1.70 u dve varijante) radi njihovog međusobnog poređenja.

Analizom sadržaja gasova nakon testova uočava se vrlo sličan trend u promenama koncentracija vodonika, metana i etana, tabela 2. Očekivano je da su apolutni iznosi koncentracija veći u laboratorijskim testovima jer je cela zapremina ulja na temperaturi od 120 °C, a u transformatoru je temperatura heterogeno raspodeljena.

TABELA 2 - Sadržaj gasova nakon testova gasiranja ulja (ppm)

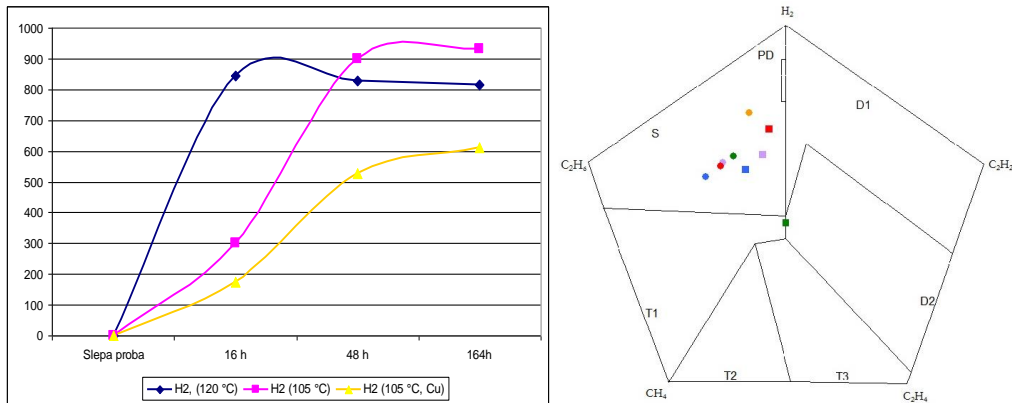
Test 1: 120 °C (CIGRE Brošura 296)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
Početni uzorak	0	0	0	0	0	5	101	29311
16 h	844	293	0	9	113	826	1213	258
164 h	814	316	0	17	123	969	1999	517
(164+16) h	130	38	0	6	22	988	1140	272
Test 2: 105 °C (CIGRE radna grupa D1.70)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
Početni uzorak	0	1	0	0	3	9	210	30229
48 h	899	223	0	9	100	855	1241	513
164 h	932	234	0	13	108	903	1721	435
Test 3: 105 °C, bakar (CIGRE radna grupa D1.70)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
Početni uzorak	0	1	0	0	3	9	210	30229
48 h	527	267	0	14	194	851	1348	638
164 h	612	258	0	15	175	899	1780	203

Prvi uzorak ulja je analiziran već nakon 16 h zagrevanja (test 1), a to ispitivanje daje naznaku o početnom nastajanju gasova i slično je kao vreme trajanja toplotnih testova u fabrici (9). Analizom sadržaja nastalih gasova uočava se visoka koncentracija vodonika kao gasa za čiji je nastanak potrebna najmanja energija (najniža temperatura). Prateći gasovi su metan i etan, u koncentracijama koje su dosta niže ali ipak značajne. Uočljiva je i velika potrošnja kiseonika, čija je koncentracija snižena više od 100 puta. Velika potrošnja kiseonika zajedno sa porastom navedenih gasova, ali i oksida ugljenika, su znak povećane oksidacije ulja.

Analizom rezultata sadržaja gasova nakon 164 h, utvrđen je dalji porast koncentracija metana i etana, dok je količina vodonika nešto niža od prethodne što može značiti da je gasiranje ulja dostiglo ravnotežno stanje (takozvani plato) pri kome je brzina nastajanja gasova konstantna. Poslednje merenje, na uzorku (164+16) h pokazalo je znatno niže koncentracije nego u prvih šesnaest sati testa što jeste potvrda da nastajanje gasova ulazi u ravnotežno stanje.

U testovima 2 i 3, zagrevanje ulja je sprovedeno na nešto nižoj temperaturi (105 °C), a merenje sadržaja gasova je izvršeno nakon 48 h i 164 h. U testu 2 je ulje degazirano i zasićeno vazduhom, a u testu 3 je, u tako pripremljeno ulje, dodata i pločica od bakra u cilju adekvatnije simulacije uslova u transformatoru. U cilju poređenja sa prvim testom, vreme zagrevanja je produženo do 164 h. Rezultati ispitivanja sadržaja gasova nakon ovih testova pokazali

su slične rezultate. Nakon testa 2, u ulju su detektovani isti gasovi, kao i kod testa 1 i u sličnom koncentracionom opsegu. U uzorku ulja sa bakrom (test 3), uočena je nešto niža proizvodnja vodonika, dok su koncentracije metana i etana nešto više u odnosu na uzorke ulja iz prethodnih testova (Slika 3).



SLIKA 3 - Grafički prikaz promene sadržaja vodonika u testovima – levo i Duvalov pentagon 1 (tačke: ulje iz pogona, kvadratići: ulje nakon testova gasiranja) – desno

Na slici 3. je prikazan Duvalov pentagon 1 sa unetim vrednostima sadržaja gasova i iz ulja iz pogona (tačke) i iz ulja nakon testova gasiranja (kvadratići). Sve tačke nastale ukrštanjem procentualnog udela koncentracija pet gasova nalaze se u oblasti tzv. gasiranja ulja što dovodi do zaključka da je u predmetnom transformatoru dokazano prisustvo gasiranja ulja.

Primer 2. Kod distributivnog transformatora 35/6 kV, 8 MVA, koji je u pogonu manje od 10 godina, rezultati gasnohromatografske analize (tabela 3) kroz prvih nekoliko godina pogona ne pokazuju promenu u količinama rastvorenih gasova. Izmerene koncentracije gasova posledica su normalnog rada transformatora pod uobičajenim pogonskim uslovima.

TABELA 3 - Sadržaj gasova ulja iz pogona (ppm)

Godina	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	O ₂
2009	1	1	2	0	43	21841
2011	3	0	7	0	114	22174
2013	7	1	4	0	67	24448
2017	244	21	3	15	107	17183
2017	499	34	6	20	162	21053

Međutim, merenja iz 2017. godine pokazala su značajan porast koncentracije vodonika, ali i metana i etana kao pratećih gasova. Uočen je i blagi pad sadržaja kiseonika. Ovaj tip promena u koncentracijama navedenih gasova odgovara pojavi gasiranja ulja, a potvrdu za to dali su Duvalov trougao i pentagon.

Ispitivanjem fizičkih hemijskih i električnih karakteristika ulja utvrđeno je da je u pitanju malo ostarelo ulje. Ulje je inhibirano, a sadržaj aromata je 7,8 %. Niži sadržaj

ugljovodonika aromatskog porekla (aromata) ukazuje na bolji stepen rafinacije ulja.

Ulje iz ovog transformatora je podvrgnuto testovima gasiranja ulja, a rezultati sadržaja gasova nakon testa su prikazani u tabeli 4.

TABELA 4 - Sadržaj gasova nakon testova gasiranja ulja (ppm)

Test 1: 120 °C (CIGRE Brošura 296)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
Početni uzorak	0	0	0	0	1	3	65	30747
16 h	88	5	0	5	1	303	598	17013
164 h	338	63	0	26	18	742	1625	542
(164+16) h	17	1	0	1	0	172	330	25234
Test 2: 105 °C (CIGRE radna grupa D1.70)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
Početni uzorak	0	0	0	0	0	3	148	32860
48 h	83	4	0	6	1	304	667	16122
164 h	111	9	0	15	1	402	1144	9800

Test 3: 105 °C, bakar (CIGRE radna grupa D1.70)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
Početni uzorak	0	0	0	0	0	3	148	32860
48 h	38	5	0	30	1	403	862	12590
164 h	112	16	0	37	1	613	1679	457

Ponašanje gasova nakon testova gasiranja ulja je slično kao u prethodnom slučaju (primer 1) ali su apsolutne vrednosti sadržaja vodonika daleko niže. To se pogotovo vidi kod testova 2 i 3 koji se izvode na nižoj temperaturi. Posmatrajući brzinu porasta količine vodonika u uljima na različitim temperaturama može se izvući zaključak da bi u pogonskim uslovima do značajnog porasta vodonika došlo tek na višoj radnoj temperaturi, odnosno većem opterećenju transformatora. Ovakav trend promena koncentracija vodonika, ali i metana i etana, uočava se i posmatranjem promene količina gasova kroz godine pogona (tabela 3).

Poređenjem ova dva primera može se izvući zaključak da se kod bolje rafiniranih ulja (manji sadržaj aromata) u manjoj meri dolazi do pojave gasiranja ulja. Takođe, nameće se činjenica da neinhibirano ulje proizvodi znatno veću količinu vodonika i ugljendioksida, uz sporiju potrošnju kiseonika.

U slučaju transformatora iz primera 2 ostaje mogućnost da je povećana koncentracija vodonika posledica preopterećenja, pregrevanja ili nekompatibilnosti sa konstrukcionim metalima (jezgro, katalitičko hidrogenovanje) što će biti predmet daljeg praćenja.

Primer 3. Kod novog transformatora 35/0,4 kV, 0,25 MVA, koji nikada nije bio u pogonu i služi kao rezerva oko 10 godina, ispitan je sadržaj gasova pre puštanja u pogon (slika 4). Rezultati gasnohromatografske analize (tabela 5) pokazali su se veoma neobičnim.



SLIKA 4 - Nov transformator 35/0,4 kV, 0,25 MVA

Iako je očekivano da u ulju nema gasova ili da ih ima u manjoj količini, jer transformator nije u pogonu, izmerene su povišene koncentracije vodonika i metana, kao i izvesne koncentracije ugljenmonoksida i ugljendioksida.

TABELA 5 - Sadržaj gasova ulja iz pogona (ppm) i grafički prikaz

Godina	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
2017	181	86	1	2	2	550	2600	10114

Pošto Duvalov trougao 1 daje šifru kvara T1 tj. grejanje u nižem temperaturnom opsegu (ispod 300 °C) rezultati su dalje analizirani u trouglu 4 i pentagonu, pri čemu je dobijena šifra S – gasiranje ulja. U ovom slučaju je došlo do nastajanja vodonika iako transformator nikada nije bio u pogonu, bez postojanja povišene temperature.

Zatim je ulje iz ovog transformatora podvrgnuto testovima gasiranja ulja, kako bi se potvrdilo gasiranje ulja, a rezultati sadržaja gasova nakon testa su prikazani u tabeli 6.

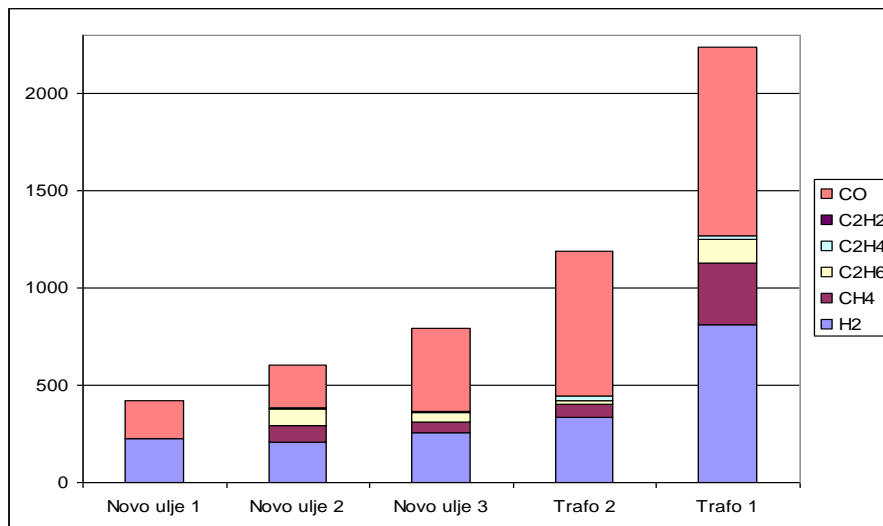
TABELA 6. Sadržaj gasova nakon testova gasiranja ulja (ppm)

Test 1: 120 °C (CIGRE Brošura 296)								
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂
Početni uzorak	0	0	0	0	0	3	96	34297
16 h	13	1	0	0	0	44	176	28463
164 h	167	5	0	2	0	315	432	12164
(164+16) h	39	1	0	1	0	66	129	33515

Sadržaj gasova nakon testova gasiranja ulja je sličan kao i sadržaj gasova u ulju iz transformatora. Povišenu koncentraciju vodonika i metana prati pad koncentracije kiseonika. Pošto je ulje inhibirano, nije došlo do većeg generisanja vodonika, mada je očekivana veća količina vodonika nakon testa.

Ovim primerom je pokazano postojanje gasiranja ulja čak i kod transformatora koji nikada nisu bili u pogonu. Ipak, ostaje nerazjašnjeno zašto se stvaraju vodonik i metan u bezteretnim uslovima tj. ne zna se da li je u pitanju nekompatibilnost ulja i materijala u transformatoru ili gasiranje potiče samo od ulja i eventualne kontaminacije u toku proizvodnje i nalivanja ulja.

Primer 4. Testu gasiranja ulja na temperaturi od 120 °C i u prisustvu vazduha podvrgnuta su i pojedina nekorišćena izolaciona ulja (novo ulje 1, novo ulje 2 i novo ulje 3) i ulja iz transformatora u pogonu - primeri 1 i 2 (slika 5). Na dijagramu je prikazana razlika u ukupnom zbiru sagorivih gasova kao i zastupljenost pojedinih gasova u ulju nakon 164 h grejanja. Kao dominantan gas se uglavnom javlja vodonik, ali se uočava i značajan udeo ugljenmonoksida dok se prateći gasovi (etan, metan i etilen) javljaju u dosta nižem koncentracionom opsegu. U zavisnosti od stepena rafinacije ulja i od tipa ulja sadržaj vodonika nakon testa je kod nekih ulja niži (nova ulja 1-3 i ulja transformatora 2), dok je kod ulja iz transformatora 1 viši. To potvrđuje i sadržaj aromata koji se kreće od 6 % do 9 % kod novih ulja, dok je kod ulja iz transformatora 1 sadržaj aromata oko 17 %. Stepenn rafinacije ulja je u direktnoj proporciji sa sadržajem aromata, odnosno što je niži udeo aromatskih ugljovodonika to je ulje kvalitetnije.



SLIKA 5. Ukupan sadržaj sagorivih gasova nakon testa gasiranja (164 h, 120 °C)

ZAKLJUČAK

Brzina nastajanja i odnos koncentracija gasova kvara jesu pouzdan alat za indikaciju pogonskog stanja i ispravnosti transformatora. Ipak, poslednjih godina načinjen je značajan pomak u dijagnostici stanja transformatora uvođenjem Duvalovih trouglova 4 i 5 i pentagona, koji predstavljaju novi aspekt prilikom analize sadržaja gasova u ulju.

Neka izolaciona ulja pod uslovima povišene ili čak uobičajene radne temperature transformatora proizvode određene količine gasova bez prisustva termičkog ili električnog kvara transformatora. Primerom je pokazano da čak i u slučaju novog ulja u novom transformatoru, koji nikada nije bio u pogonu, može doći do pojave povišene koncentracije vodonika tj. do pojave gasiranja ulja (eng. stray gassing). Zato se preporučuje ispitivanje sadržaja

gasova na uljima pre ulaska transformatora u pogon, kao i na novim uljima pre punjenja transformatora, što će biti preporuka revidiranog standarda IEC 60296. U slučaju da se nakon analize sadržaja gasova iz ulja transformatora, nekom od metoda interpretacije dođe do šifre S – gasiranje ulja, preporučuje se test gasiranja ulja (ASTM D7150 ili CIGRE br. 296) na uzorku ulja iz transformatora, radi utvrđivanja da li postoji gasiranje ulja. Ispitivanjem parcijalnih pražnjenja transformatora može se potvrditi prisustvo ili odsustvo parcijalnih pražnjenja. Na taj način se može razrešiti dilema da li su u transformatoru prisutna parcijalna pražnjenja ili gasiranje ulja.

Poređenjem dva slučaja transformatora u pogonu može se izvući zaključak da se kod bolje rafiniranih ulja (manji sadržaj aromata) u manjoj meri dolazi do pojave gasiranja ulja. Takođe, nameće se činjenica da neinhibirano ulje proizvodi znatno veću količinu vodonika, pratećih ugljovodonika (metana i etana) i ugljendioksida, uz veću potrošnju kiseonika.

Radeni su uporedni testovi gasiranja ulja na različitim temperaturama (CIGRE Brošura 296, CIGRE radna grupa D1.70 u dve varijante). Rezultati ispitivanja sadržaja gasova nakon ovih testova pokazali su slične rezultate.

LITERATURA

1. Steve Eeckhoudt, Stijn Autru, and Luc Lerar, 2017, „Stray gassing of transformer insulating oils: Impact of materials, oxygen content, additives, incubation time and temperature, and its relationship to oxidation stability”, „IEEE Electrical Insulation Magazine”, vol. 33, no. 6, str. 27-32
2. 2006, „Technical Brochure D1.01/A2.11: Recent developments on the interpretation of dissolved gas analysis in transformers”
3. Ivanka Atanasova, „Transformer materials and their influence on diagnostics”
4. Internacional standard IEC 60296, „Fluids for electrotechnical applications – Unused mineral insulating oils for transformers and switchgear”, 2012.
5. ASTM-D7150-13 „Standard Test Method for the Determination of Gassing Characteristics of Insulating Liquids Under Thermal Stress”, 2013.
6. Internacional standard IEC 60599, „Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis”, 2015.
7. M. Duval, 2008, „New frontiers of DGA interpretation for power transformers and their accessories”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 24 No 6, Nov-Dec 2008.
8. M. Duval, L. Lamarre, 2014, „The Duval pentagon – A new complementary tool for the interpretation of dissolved gas analysis in transformers”, IEEE Electrical Insulation Magazine, Vol 30 No 6, 2014.
9. Gassing Characteristics of Transformer - LewandGriffin