

Ivanka Radić
Končar D&ST
ivanka.radic@koncar-dst.hr

Sanela Carević
Končar D&ST
sanela.carevic@koncar-dst.hr

Zoran Pršec
Končar D&ST
zoran.prsec@koncar-dst.hr

Marijana Majić
Končar D&ST
marijana.majic@koncar-dst.hr

ANALIZA OTOPLJENIH PLINOVA U IZOLACIJSKIM TEKUĆINAMA HERMETIČKI ZATVORENIH DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA

SAŽETAK

Analiza otopljenih plinova (DGA) plinskom kromatografijom važna je metoda dijagnostike stanja izolacijskog sustava transformatora. Koristi se redovito kod energetske transformatora, a sve češće i za distributivne i specijalne transformatore prilikom tvorničkih ispitivanja, kao i kod redovnog praćenja rada transformatora u pogonu.

U radu će biti prikazani rezultati analize plinova u distributivnim transformatorima tijekom tvorničkih testova (pokusa zagrijavanja) s različitim izolacijskim tekućinama (mineralna ulja, prirodni i sintetski esteri) i s različitim unutarnjom korozivnom zaštitom kotlova transformatora.

Ključne riječi: DGA, plinska kromatografija, distributivni transformatori, izolacijske tekućine, korozivna zaštita

ANALYSIS OF DISSOLVED GASES IN INSULATING LIQUIDS OF HERMETICALLY SEALED DISTRIBUTION TRANSFORMERS

SUMMARY

Dissolved gases analysis (DGA) using gas chromatography, is an important diagnostic method of the condition of the transformer insulation system. It is used regularly for power transformers, and more often for distribution and special transformers during factory tests, as well as for regular transformer monitoring in operation.

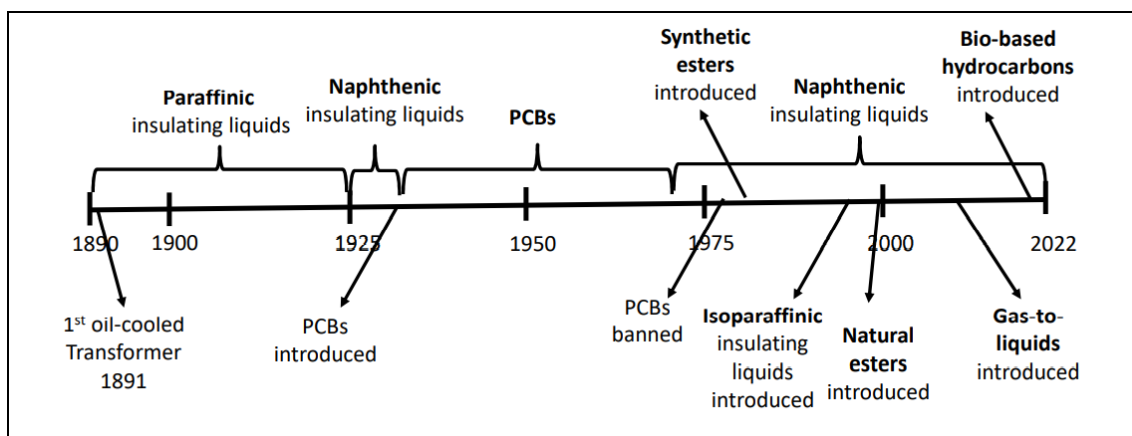
The paper will present the results of gas analysis in distribution transformers during factory tests (temperature rise tests) with different insulating liquids (mineral oils, natural and synthetic esters) and with different internal corrosion protection of transformer tanks.

Key words: DGA, gas chromatography, distribution transformers, insulating liquids, corrosion protection

1. UVOD

1.1. Vrste izolacijskih tekućina u distributivnim transformatorima

Danas su u upotrebi različite vrste izolacijskih tekućina, a najčešće korištena su mineralna ulja (naftenska i izoparafinska ulja) te esteri (prirodni i sintetski). Različitog su porijekla i različite strukturne formule, a imaju istu funkciju u transformatoru: odvođenje topline i izoliranje dijelova pod naponom. Na slici 1. je prikazan razvoj izolacijskih tekućina za transformatore kroz povijest.



Slika 1. Razvoj izolacijskih tekućina za transformatore kroz povijest

Mineralna ulja na naftenskoj bazi su i dalje najčešće korišten izolacijski medij u distributivnim transformatorima. Trendovi zahtjeva tržišta, zakonska regulativa i specijalne primjene (zaštita okoliša, nezapaljivost) razlozi su sve šire primjene esterskih izolacijskih tekućina u specijalnim i distributivnim transformatorima. Transformatori punjeni esterom koriste se najčešće u zatvorenim stambenim objektima, vodozaštitnim područjima te objektima u kojima propisi zdravlja i sigurnosti nalažu potrebu za korištenjem biorazgradivih i nezapaljivih izolacijskih tekućina (poput transformatora za vlak) [1].

Iako se esterske izolacijske tekućine koriste desetljećima, postoji još mnoštvo otvorenih pitanja oko ispitivanja, kao i interpretacije rezultata. Dostupne norme za ispitivanje i evaluaciju rezultata DGA analize isključivo su vezane za mineralna ulja. Isti standardi koriste se i za esterske izolacijske tekućine jer se stvaraju isti plinovi uslijed električnih i toplinskih naprezanja, no količine nastalih plinova, relativni omjeri i topivost plinova u esterskim izolacijskim tekućinama su drugačiji pa stoga interpretacija rezultata zahtjeva drugačiji pristup [1].

1.2. Plinska kromatografija (DGA)

Kromatografska ispitivanja plinova otopljenih u transformatorskom ulju (DGA – „dissolved gas analysis“) je „krvna slika transformatora“ koja otkriva rane znakove nepoželjnih procesa te je vrlo koristan alat za dijagnostiku stanja izolacijskog sustava. Povećana količina plinova često je prva indikacija greške koja bi s vremenom mogla dovesti do kvara. DGA analiza je rutinsko ispitivanje kod energetskih transformatora u radu, kao i dio završne kontrole kvalitete tijekom i nakon tvorničkih ispitivanja transformatora napona viših od 72,5 kV. Međutim, pojedini kupci transformatora svjesni prednosti koje analiza plinova u ulju pruža, uvrstili su kromatografska ispitivanja kao obavezna i za manje jedinice srednjih energetskih transformatora, a sve češće i za distributivne i specijalne transformatore [2].

Uzroci nastanka plinova mogu biti sljedeće greške: parcijalna izbijanja, termička naprezanja ili iskrenja u ulju (Tablica I.) [3].

Tablica I. Vrste kvarova

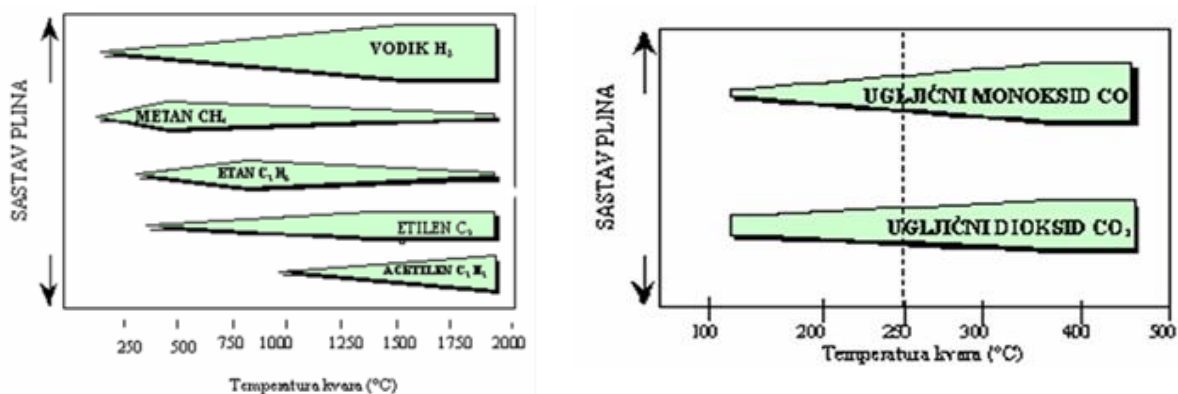
<i>PD</i>	parcijalna izbijanja
<i>D1</i>	izbijanja niskog intenziteta
<i>D2</i>	izbijanja visokog intenziteta
<i>T1</i>	termičke greške; $T < 300^{\circ}\text{C}$
<i>T2</i>	termičke greške; $300^{\circ}\text{C} < T < 700^{\circ}\text{C}$
<i>T3</i>	termičke greške; $T > 700^{\circ}\text{C}$

1.3 Nastanak plinova u izolacijskim tekućinama

Uslijed povećanih termičkih i električnih napreznja, može doći do cijepanja veza unutar molekula izolacijskog ulja i stvaranja molekula plina: vodik (H-H), metan (CH₄), etan (C₂H₆), etilen (C₂H₄) ili acetylen (C₂H₂). Nastali plinovi se otapaju u ulju ili se izdvajaju kao slobodni plinovi. Niska energija, kod greške kao što su parcijalna izbijanja, raskida najslabije veze C-H (338 kJ/mol) i stvara se vodik kao glavni plin. Što je više energije (temperature) uključeno, cijepaju se jače C-C veze i rekombiniraju u molekule plinova s jednostrukom vezom (C-C – 607 kJ/mol; metan, etan); dvostrukom vezom (C=C – 720 kJ/mol; etilen); trostrukom vezom (C≡C – 960 kJ/mol; acetylen). Prisustvo acetilena ukazuje da je prisutna visokotemperaturna greška, npr. iskrenje u ulju transformatora, dok prisustvo metana ukazuje na nisko-energetsku električnu ili termičku grešku.

Degradacija papira (celuloze) ubrzava se istovremenim djelovanjem temperature, kisika i vlage. Degradacijom celuloze nastaju ugljični monoksid (CO), ugljični dioksid (CO₂), voda te manja količina ugljikovodičnih plinova i furana.

Na slici 2. prikazana je ovisnost nastanka plinova o temperaturi.



Slika 2. Ovisnost količine nastanka plinova o temperaturi

Ponekad se plinovi mogu generirati u transformatorskom ulju i bez prisutne greške u radu transformatora kao rezultat neke kemijske reakcije: hrđanje, reakcije ulja s čelikom, zaštitnim premazom i sl. Vodik najčešće nastaje u ovim slučajima reakcijom čelika ili pocinčanih površina uz prisustvo vode i kisika ili reakcijom slobodne vode i unutarnjih premaza. Također, vodik može zaostati tijekom procesa proizvodnje čelika ili zavarivanja pa se polako u kontaktu s uljem oslobodi. Osim vodika mogu se pojaviti i drugi plinovi [3].

Plinovi mogu nastati i zbog same oksidacije ulja na povišenim temperaturama (višim od 200 °C) tj. „stray gassing“ pojavi. Metan, etan i vodik nastaju kao rezultat ove pojave, a ovisno o strukturi (vrsti) ulja. „Stray gassing“ nije štetna pojava u transformatoru i nije povezana s greškom u radu transformatora.

Kako je gore navedeno plinovi u izolacijskom ulju mogu nastati kao rezultat greške u radu transformatora, ali i kao rezultat kemijske reakcije s materijalima i termo-oksidacije ulja. Dostupne metode interpretacije rezultata plinske kromatografije ne razlikuju ove pojmove, što može dovesti do pogrešne interpretacije rezultata.

2. DGA TIJEKOM POKUSA ZAGRIJANJA DISTRIBUTIVNIH TRANSFORMATORA

Kod tvorničkih ispitivanja transformatora, DGA je najkorisnija za praćenje porasta koncentracije plinova tijekom pokusa zagrijavanja. Nastanak plinova nakon pokusa zagrijavanja u distributivnim transformatorima bez prisutne greške može biti i rezultat kemijske reakcije izolacijske tekućine s unutarnjom korozivnom prevlakom kotlova (kako je pojašnjeno u prethodnom poglavlju). Unutarnje prevlake kotlova distributivnih transformatora mogu biti bojane organskim ili praškastim premazima, vruće cinčane ili kombinacija ove dvije (vruće cinčanje + bojanje). U transformatorima s esterskim izolacijskim tekućinama tradicionalno su se unutarnje površine cinčanih kotlova dodatno bojale zbog moguće nekompatibilnosti cinka i estera. Novija istraživanja pokazuju da za distributivne transformatore sa standardnom radnom temperaturom nije potrebno dodatno bojanje cinčanih prevlaka. Iz tog razloga proveden je niz DGA ispitivanja na različitim distributivnih transformatorima te su rezultati niže prikazani. Zbog ograničenosti veličine kade za vruće cinčanje, cinčati se mogu samo manji kotlovi te su predmet ovih istraživanja bile jedinice manjih snaga distributivnih transformatora. Također u ovim transformatorima je za očekivati veći utjecaj materijala na ulje tj. omjer materijal/ulje je stroži u odnosu na jedinice većih snaga distributivnih transformatora.

U tablici II. i III prikazani su rezultati DGA prije i nakon pokusa zagrijavanja na transformatorima s mineralnim uljem. TG (total gas) predstavlja ukupnu količinu svih otopljenih plinova. Uzorci su uzimani prije te nakon provedenog pokusa. U tablici II. kotao je cinčan i dodatno bojan, dok je u tablici III. kotao samo cinčan. Iz rezultata je vidljivo da se u oba slučaja pojavljuje plin vodik, dok su ostali plinovi ispod granice detekcije.

Tablica II. DGA tijekom pokusa zagrijavanja; 100 kVA, Um=24 kV, kotao cinčan + bojan, mineralno ulje

Mineralno ulje	H ₂ [ppm]	CH ₄ [ppm]	C ₂ H ₂ [ppm]	C ₂ H ₄ [ppm]	C ₂ H ₆ [ppm]	CO [ppm]	CO ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	N ₂ [ppm]	TG [mL/L]
<i>Tipične vrijednosti</i>	35	5	1	2	5	80	200	-	-	-
prije svih ispitivanja	<2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5	10,4	1501	5734	7,3
prije zagrijanja	4,8	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5	22,7	1742	5900	7,7
neposredno nakon zagrijanja	17	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	19	111	2386	8365	10,9
24 h nakon zagrijanja	21	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	23	107	2615	9520	12,3
48 h nakon zagrijanja	16	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	21	120	7309	19100	26,6

Tablica III. DGA tijekom pokusa zagrijavanja; 100 kVA, Um=24 kV, kotao cinčan, mineralno ulje

Mineralno ulje	H ₂ [ppm]	CH ₄ [ppm]	C ₂ H ₂ [ppm]	C ₂ H ₄ [ppm]	C ₂ H ₆ [ppm]	CO [ppm]	CO ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	N ₂ [ppm]	TG [mL/L]
<i>Tipične vrijednosti</i>	35	5	1	2	5	80	200	-	-	-
prije svih ispitivanja	<2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5	12,9	1675	6120	7,8
prije zagrijanja	<2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	2,0	25,6	1846	6014	7,9
neposredno nakon zagrijanja	23	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	17	44	1163	4283	5,5
24 h nakon zagrijanja	27	0,2	<0,1	<0,1	<0,1	24	44	1064	4062	5,2
48 h nakon zagrijanja	22	0,3	<0,1	<0,1	<0,1	18	70	5909	14516	20,5

U tablici IV. i V. prikazani su rezultati DGA prije i nakon pokusa zagrijavanja na transformatorima s prirodnim esterom. U tablici IV. kotao je cinčan i dodatno bojan, dok je u tablici V. kotao samo cinčan. Iz rezultata je vidljivo da u slučaju prirodnih estera dolazi do nastanka vodika, kao i plina etana.

Iz rezultata u tablicama II.-V. vidljivo je da unutarnja zaštita kotla nema utjecaja na pojavu plinova te da se isti plinovi pojavljuju u transformatorima s cinčanim kotlovima kao i u transformatorima gdje su kotlovi dodatno obojani bez obzira na vrstu izolacijske tekućine. U tablicama s mineralnim uljima (II. i III.) navedene su tipične (očekivane) vrijednosti plinova prilikom tvorničkih testova, koje su dobivene statističkom obradom novih transformatora praćenih kroz period od 8 godina. Prema dosadašnjem iskustvu isti kriteriji ne vrijede za estere, što je i vidljivo prema prikazanim rezultatima.

Tablica IV. DGA tijekom pokusa zagrijavanja; 100 kVA, Um=24 kV, kotao cinčan + bojan, prirodni ester

Prirodni ester	H ₂ [ppm]	CH ₄ [ppm]	C ₂ H ₂ [ppm]	C ₂ H ₄ [ppm]	C ₂ H ₆ [ppm]	CO [ppm]	CO ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	N ₂ [ppm]	TG [mL/L]
prije svih ispitivanja	<2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5	15,8	1532	6337	7,9
prije zagrijanja	10,4	<0,1	<0,1	<0,1	0,47	3,7	22,6	1272	5471	6,8
neposredno nakon zagrijanja	22,1	<0,1	<0,1	<0,1	4,5	5,5	52,9	1423	5766	7,3
24 h nakon zagrijanja	21,7	<0,1	<0,1	<0,1	4,1	6,3	42,7	1235	5347	6,7
48 h nakon zagrijanja	43	0,6	<0,1	<0,1	11,4	20	143	1377	5530	7,2

Tablica V. DGA tijekom pokusa zagrijanja, 100 kVA, Um=24 kV, kotao cinčan, prirodni ester

Prirodni ester	H ₂ [ppm]	CH ₄ [ppm]	C ₂ H ₂ [ppm]	C ₂ H ₄ [ppm]	C ₂ H ₆ [ppm]	CO [ppm]	CO ₂ [ppm]	O ₂ [ppm]	N ₂ [ppm]	TG [mL/L]
prije svih ispitivanja	<2	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<5	14,4	1699	6728	8,4
prije zagrijanja	10,2	<0,1	<0,1	<0,1	0,23	7,1	57,2	1535	6382	8
neposredno nakon zagrijanja	19,9	<0,1	<0,1	<0,1	3	13,4	55,7	1632	6963	8,7
24 h nakon zagrijanja	20,1	<0,1	<0,1	<0,1	3,9	11,1	43,3	1524	6834	8,4
48 h nakon zagrijanja	37	0,6	<0,1	<0,1	5,3	19	101	1130	4428	5,8

DGA ispitivanja provedena su i na nizu drugih distributivnih transformatora različitih nazivnih snaga, te su neki od rezultata prikazani u tablici VI. Svi transformatori uspješno su prošli termičke, kao i ostale tvorničke testove u Ispitnoj stanici.

Pojava vodika je uočena u svim slučajima bez obzira na vrstu izolacijske tekućine ili vrstu unutarnje korozivne zaštite kotla. Također, očekivano u svim slučajima nakon zagrijavanja, porasle su i koncentracije ugljičnog monoksida i dioksida. Kod prirodnih estera dodatno se pojavljuje etan, dok u slučaju sintetskog estera na ispitanim transformatorima nije došlo do pojave etana.

Pojava etana u prirodnim esterima može se pripisati „stray gassing“ pojavi tj. oksidaciji prirodnih estera pri povišenim temperaturama. Količina nastalog etana ovisi o vrsti prirodnih estera (suncokret, uljana repica, soja) te je znatno viša kod estera s više polinezasićenih molekula (soja) [4]. Ova činjenica ne znači da su prirodni esteri s više polinezasićenih molekula lošiji, nego da je baza tog estera drugačija te da to treba imati na umu kod interpretacije rezultata DGA analize.

Tablica VI. DGA tijekom pokusa zagrijavanja različitih distributivnih transformatora

Nazivna snaga, U_m	ulje	KOTAO*		H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	O ₂	N ₂
500 kVA, $U_m=12$ kV	Sintetski ester	bojan	prije	< 2	< 0,1	< 01	< 0,1	< 0,1	1,4	28	5800	1840
			poslije	4	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	8,7	80,1	15592	4359
250 kVA, $U_m=17,5$ kV	Prirodni ester 1	bojan	prije	< 2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,9	1,8	16,5	4021	934
			poslije	9,6	< 0,1	< 0,1	0,18	15,1	5,3	27,2	4480	1046
250 kVA, $U_m=24$ kV	Prirodni ester 1	bojan	prije	1,8	< 0,1	< 01	< 0,1	0,99	1,1	16,4	4345	1061
			poslije	11,1	< 0,1	< 0,1	0,29	26,3	7,5	46,7	5486	1334
250 kVA, $U_m=36$ kV	Prirodni ester 1	bojan	prije	4,4	0,15	< 0,1	< 0,1	2,6	2,3	21,9	4562	1113
			poslije	15,3	0,14	< 0,1	0,17	15,8	8,2	42,5	4617	1051
630 kVA, $U_m=12$ kV	Prirodni ester 2	bojan	prije	< 2	< 0,1	< 01	< 0,1	2	1,5	15,5	3941	809
			poslije	3,3	0,11	< 0,1	0,13	13,9	3,4	35,1	4778	1133
400 kVA, $U_m=24$ kV	Prirodni ester 1	bojan	prije	2,5	0,11	< 0,1	< 0,1	5,6	< 5	35,36	4644	1018
			poslije	6,4	0,35	< 0,1	0,34	27,7	7,7	62,7	4878	1132
630 kVA, $U_m=24$ kV	Prirodni ester 1	cinčan	prije	0,31	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,9	< 5	18,5	4354	1063
			poslije	2,7	< 0,1	< 0,1	0,24	17,9	5,9	53,9	4418	1075
160 kVA, $U_m=24$ kV	Mineralno ulje	cinčan	prije	2,6	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 5	13,9	4247	1136
			poslije	52,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	1,2	29,3	5834	1818
250 kVA, $U_m=24$ kV	Mineralno ulje	cinčan	prije	2,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 5	17,2	4572	1258
			poslije	11,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	3,1	37,5	4387	1191
800 kVA, $U_m=24$ kV	Sintetski ester	cinčan +bojan	prije	6,2	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 5	16,8	4415	1160
			poslije	13,8	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	4,2	27,9	4469	1141

3. ZAKLJUČAK

Analiza otopljenih plinova (DGA metoda) koristi se kao važan alat kod otkrivanja greški u radu transformatora koje se mogu uočiti već prilikom tvorničkih ispitivanja transformatora. No plinovi otopljeni u ulju mogu nastati i bez prisutne greške u transformatoru, a uslijed utjecaja materijala ili termo-oksidacije („stray gassing“) izolacijskih tekućina.

Interpretacija rezultata DGA analize nije jednoznačna jer treba uzeti u obzir niz faktora: tip transformatora, nazivnu snagu, nazivne napone, sustav disanja, godine eksploatacije te svakako treba poznavati i vrstu te ponašanje izolacijske tekućine. Za mineralna izolacijska ulja postoji dugogodišnje iskustvo u primjeni i niz alata, kao i objavljenih normi za interpretaciju rezultata DGA analiza, no za estere to nije slučaj. Kako raste upotreba prirodnih i sintetskih estera u distributivnim transformatorima, tako raste i znanje oko ponašanja ovih dielektrika.

Tvornički testovi opisani u ovom radu, provedeni na distributivnim transformatorima različitih napona s različitim izolacijskim tekućinama i različitom unutarnjom zaštitom kotla, pokazala su da nastali plinovi ovise o vrsti izolacijske tekućine. U slučaju mineralnih ulja karakteristična je pojava vodika, dok u slučaju estera uz vodik imamo i etan kao produkt termo oksidacije. Također treba uzeti u obzir i mogući utjecaj materijala jer u slučaju distributivnih transformatora omjer materijal/ulje znatno je manji nego kod transformatora viših snaga te su stoga i očekivane više koncentracije plinova, prvenstveno vodika.

Unutarnja korozivna zaštita kotla u prikazanim slučajima nije imala direktan utjecaj na razvoj plinova.

Svi opisani transformatori uspješno su prošli sve propisane tvorničke testove u Ispitnoj stanici a nastali plinovi predstavljaju početno stanje za daljnje praćenje rada transformatora.

4. LITERATURA

- [1] I. Atanasova -Hohlein, C. Schutt, „Testing challenges with ester insulating liquids“, Study Committee A2/P2, CIGRE Paris 2022
- [2] I. Radić, V. Matun, V. Maljković, B. Jakopović, „Kromatografska ispitivanja izolacijskih ulja tijekom tvorničkih testova transformatora“, HRO CIGRE, Šibenik, 2015
- [3] IEC 60599:2022, Mineral oil-impregnated electrical equipment in service – Guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis
- [4] D. Hans, „Understanding Dissolved Gas Analysis of Ester Fluids – Par 1: „Stray gas Production under Normal Operating Conditions“, Siemens Transformer Conference, 2010