

DOI: [10.46793/CIGRE37.D1.01](https://doi.org/10.46793/CIGRE37.D1.01)**D1.01****ODREĐIVANJE ODNOSA GASOVA KVARA ANALIZAMA GASOVA RASTVORENIH U
ULJU OPONAŠANJEM PREGREVANJA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA –
REZULTATI I MOGUĆE GREŠKE****DETERMINING THE FAULT GAS RATIOS BY ANALYZES OF GASES DISSOLVED IN
OIL BY SIMULATING OVERHEATING IN LABORATORY CONDITIONS - RESULTS
AND POSSIBLE ERRORS****Siniša Spremić***

Kratak sadržaj: U cilju određivanja odnosa gasova kvara u slučajevima pregrevanja (termičkih kvarova) električne opreme i uređaja punjenih izolacionim uljem, u laboratorijskim uslovima su oponašana (simulirana) pregrevanja na određenim temperaturama sa obavljenim analizama gasova rastvorenih u ulju (u daljem tekstu: AGRU). Na osnovu odnosa gasova dobijenih pregrevanjem u laboratorijskim uslovima i iskustveno za termičke kvarove u stvarnim uslovima u električnoj opremi i uređajima na osnovu detaljnih pregleda, napravljene su metode za prepoznavanje vrste termičkog kvara u električnoj opremi. Pregrevanje ulja u laboratorijskim uslovima u prikazanim primerima je korišćenjem grejača uronjenog u ulje kroz koji protiče električna struja i korišćenjem peći sa nezavisnim grejanjem posude sa uljem izvana. Razmotrena su oba načina i ukazano na mogućnosti, prednosti i nedostatke. Rezultati AGRU ulja podvrgnutih pregrevanju u laboratorijskim uslovima za nekoliko slučajeva su prikazani i detaljno razmotreni. Oni obuhvataju rezultate za različite vrste ulja (mineralno, prirodni i sintetički estri) i za različit sadržaj vlage u ulju.

Ključne reči: Termički kvarovi, Izolaciono ulje, Odnosi gasova kvara, Laboratorijska ispitivanja

Abstract: In order to determine the ratio of fault gases in cases of overheating (thermal faults) of electrical equipment and devices filled with insulating liquids, overheating at certain temperatures was simulated in laboratory conditions with dissolved gas in oil analyses (hereinafter: DGA). Based on the ratio of gases obtained by overheating in laboratory conditions and empirically for thermal faults in real conditions in electrical equipment and devices based on detailed inspections, methods were created to recognize the type of thermal faults in electrical equipment. Overheating of insulating liquids in laboratory conditions in the examples shown is by using a heater immersed in the insulating liquid through which electric current flows and by using a furnace with independent heating of the vessel with the insulating liquid from outside. Both methods were considered and the possibilities, advantages and disadvantages were pointed out. The results of DGAs of oils subjected to overheating in laboratory conditions for several cases are presented and analyzed in detail. They include results for different types of insulating fluids (mineral oil, natural esters and oil derived from gas).

Key words: Thermal fault, Insulating liquid, Ratio of fault gases, Laboratory test

* Siniša Spremić, Elektrodistribucija Srbije d.o.o. Beograd, sinisa.spremic@es.rs

1 UVOD

Razvoju metoda za određivanje vrste kvara u izolacionim tečnostima u električnoj opremi i uređajima su, pored analize stvarnih slučajeva kvarova, pomogla i laboratorijska ispitivanja. Laboratorijska ispitivanja izolacionih tečnosti su obuhvatala oglede parcijalnih pražnjenja, električnih pražnjenja i zagrevanja izolacionih tečnosti oponašanjem uslova koji se mogu očekivati u električnoj opremi i uređajima. U toku ili nakon oglada su obavljene AGRU uzoraka izolacionih tečnosti.

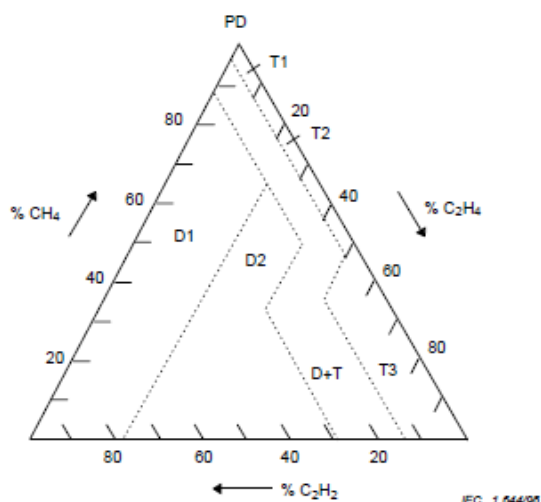
Oponašanje termičkih kvarova izolacionih tečnosti u laboratorijskim uslovima je obavljeno na dva načina. Prvi način je zagrevanje izolacione tečnosti grejačem uronjenim u izolacionu tečnost kroz koji protiče električna struja. Drugi način je korišćenjem peći sa nezavisnim grejanjem posude punjene izolacionom tečnošću izvana.

Ovde se analiziraju rezultati laboratorijskih ispitivanja oponašanja termičkih kvarova u izolacionim tečnostima i načini izvođenja laboratorijskih ispitivanja. Iz rezultata AGRU izolacionih tečnosti su dobijeni odnosi gasova koji mogu da unaprede postojeće metode u postavljanju granica, tj. u dobijanju boljih dijagnoza vrste kvara. Dosadašnjim metodama za interpretaciju rezultata AGRU bitna su ispitivanja na 300 °C i 700 °C, a druge temperature mogu da posluže za dodatne analize i kontrolu.

Ukazuje se na mogućnosti, prednosti i nedostatke načina oponašanja termičkih kvarova u laboratorijskim uslovima.

Analiza rezultata AGRU dobijenih različitim načinima oponašanja termičkih kvarova u laboratorijskim uslovima pokazuje da se neki rezultati AGRU ne mogu upotrebljavati u određivanju odnosa gasova zbog uočenih nedostataka.

Najčešće korišćene metode za tumačenje kvarova u su Duvalov trougao 1 i Duvalov trougao 5. Duvalov trougao 5 se koristi za tumačenje termičkih kvarova ukoliko Duvalov trougao 1 pokaže da nema kvarova tipa električnih pražnjenja tipova D1 i D2 uključivo mešovite ili višestruke kvarove koji uključuju i kvar električnih pražnjenja oznaka i termički kvar tipa D+T. Na slici 1 je prikazan savremen Duvalov trougao 1 sa opisom područja.



Opis područja savremenog Duvalovog trougla 1:

D2) Pražnjenja velike energije

D1) Pražnjenja male energije

D+T) Mešavina električnih i termičkih kvarova

PD) Parcijalna pražnjenja

T1) Termički kvar $T < 300^\circ\text{C}$

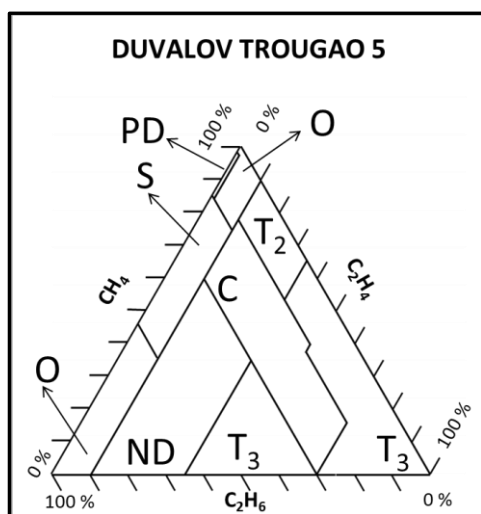
T2) Termički kvar $300 < T < 700^\circ\text{C}$

T3) Termički kvar $T > 700^\circ\text{C}$

Slika 1 – Savremeni Duvalov trougao 1

Gasovi koji se koriste u savremenom Duvalovom trouglu 1 su metan (CH_4), etilen (C_2H_4) i acetilen (C_2H_2). Izbegavanje vodonika (H_2) i etana (C_2H_6) može da dovede da se ne prepozna kvar ako se koriste samo tri gasa u savremenom Duvalovom trouglu 1.

Na slici 2 je prikazan savremeni Duvalov trougao 5.



Opis područja savremenog Duvalovog trougla 5:

S) Gasiranje ulja na nižim temperaturama (stray gassing)

O) Pregrevanje $T < 250\text{ }^{\circ}\text{C}$

T2) Termički kvar $300 < T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

T3) Termički kvar $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$

PD) Parcijalna pražnjenja tipa korone

C) Vruća tačka sa karbonizacijom papira $T_C > 300\text{ }^{\circ}\text{C}$

ND) Neodređeno (Not Defined)

Slika 2 – Savremeni Duvalov trougao 5

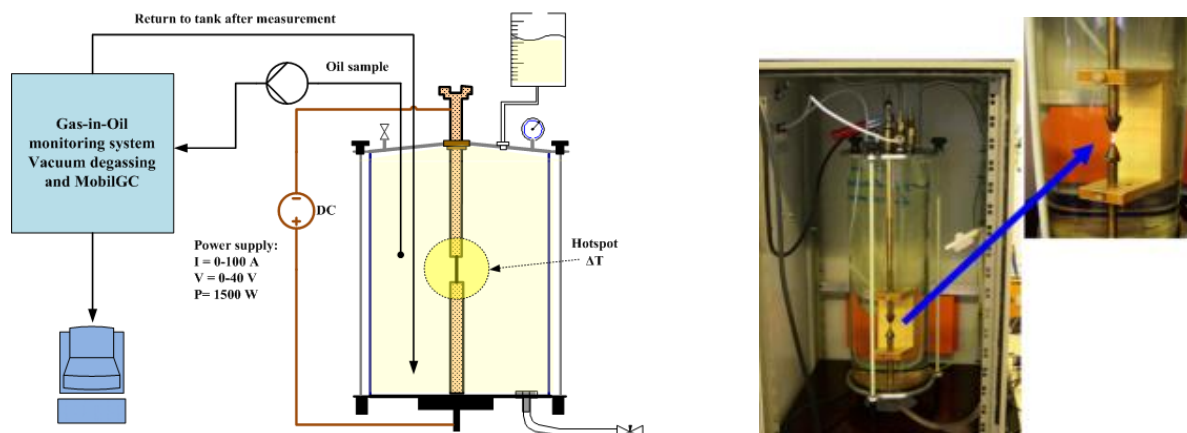
Gasovi koji se koriste u savremenom Duvalovom trouglu 5 su etan (C_2H_6), metan (CH_4) i etilen (C_2H_4). U savremenom Duvalovom trouglu 5 se može videti da je za termičke kvarove na višim temperaturama količinski je u ppm najzastupljeniji etilen, a na nižim metan i etan. Termički kvarovi su kvarovi različitih pregrevanja. Mesta pregrevanja su najčešće različiti kontakti, vijčane, varene ili presovane veze, pregrejani limovi jezgra usled cirkulacionih struja i višestrukog uzemljenja i poddimenzionisani provodnici. Pregrevanjem mogu biti zahvaćeni i materijali celuloznog porekla (papir, drvo), ali i drugi (lakovi, smole,...) što usložnjava analizu i određivanje ispravnog tumačenja.

2 ANALIZA OPONAŠANJA TERMIČKIH KVAROVA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA KORIŠĆENJEM GREJAČA

Oponašanja termičkih kvarova u laboratorijskim uslovima je prikazano u tri slične izvedbe sa različitim izvedbama grejnih tela proticanih električnom strujom uronjenih u izolacionu tečnost.

2.1 Grafitni grejač

U ovom ogledu [1] se upotrebio grafitni provodnik koji se koristi za olovke tipa 2B. Grafitni grejači se koriste jer su otporni do veoma visokih temperatura preko $3000\text{ }^{\circ}\text{C}$. Grafitni grejač je uronjen u mineralno izolaciono ulje tipa Nytro Lyra. Na slici 3 je prikazana skica i fotografija dela opreme.



Slika 3: Skica izvedbe ogleda (levo) i fotografija (desno) [1]

Određivanje temperature vruće tačke (grafitnog provodnika) je određeno merenjem otpornosti ommetrom. Jednačina za izračunavanje otpora R_T iz poznatih veličina je data u jednačini (1), a izmenom se iz izmerene otpornosti i ostalih poznatih veličina može izračunati temperatura vruće tačke prema jednačini (1) za T [1].

$$R_T = \frac{\rho \cdot L}{A} \cdot (1 + \alpha \cdot (T - 20)) \quad (1)$$

$$T = \frac{1}{\alpha} \cdot \left(R_T \cdot \frac{A}{\rho \cdot L} - 1 \right) + 20 \quad (2)$$

Jedinice i vrednosti korišćene u izračunavanju su dati ispod [1].

R_T = Otpornost grafita na određenoj temperaturi, Ω

ρ = Specifična otpornost materijala na referentnoj temperaturi 20 °C, ($3.75 \cdot 10^{-5} \Omega m$)

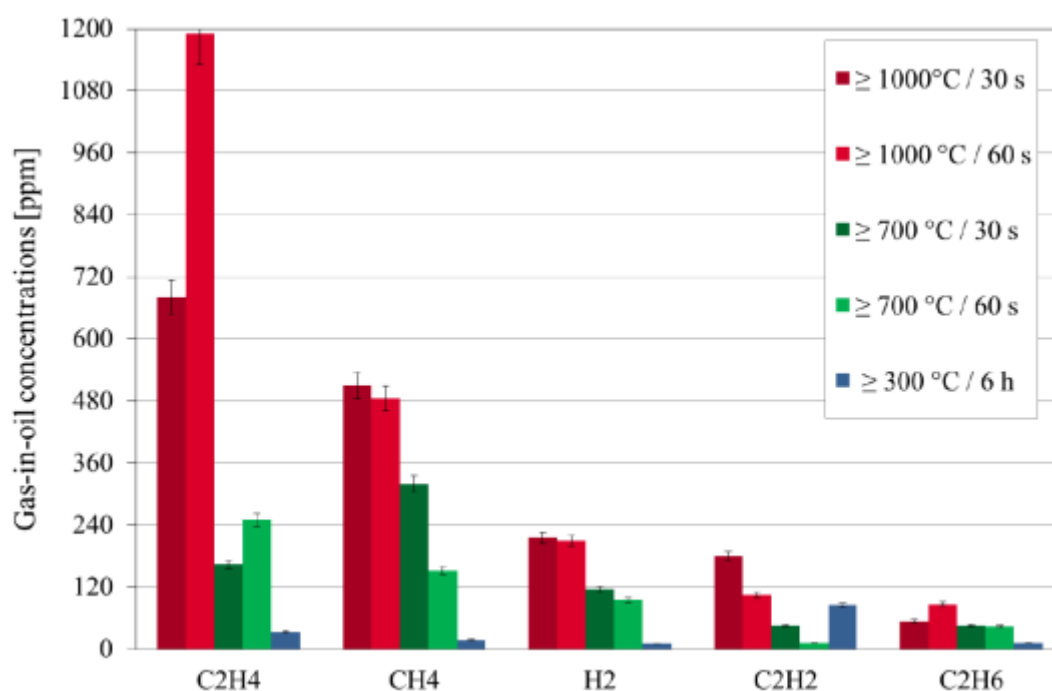
L = Dužina materijala, (0.01 m)

A = Površina poprečnog preseka materijala, ($4.65 \cdot 10^{-7} m^2$)

T = Temperatura, °C

α = Temperaturni koeficijent grafita ($4.84 \cdot 10^{-4} 1/^\circ C$)

Na slici 4 su prikazane količine gasova za različite temperature i vreme trajanja ispitivanja [1].



Slika 4: Količine gasova za različite temperature i vremena trajanja ispitivanja [1]

Pojava značajne količine acetilena na temperaturi ispitivanja od 300 °C ukazuje na problem postavke oglada. Na temperaturi od 300 °C ne bi uopšte trebalo da bude acetilena, a on je u ovom slučaju dominantan gas. Prema odnosima gasova u Duvalovom trouglu kvar je tipa D1. Na slici 3 se vidi da je trajanje ispitivanja na 300 °C bilo 6 sati. Metalne šipke između kojih je postavljen grafitni grejač (provodnik) su verovatno od mesinga. Moguće je da je usled grejanja i lošeg kontakta između šipki i

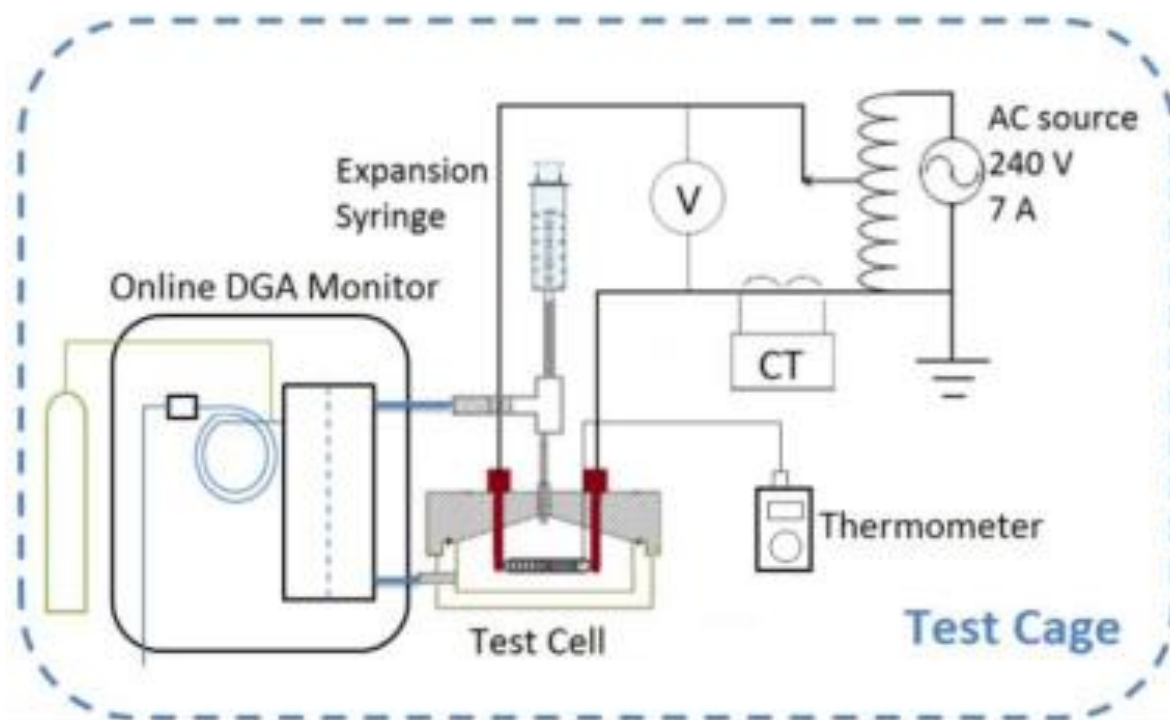
grafitnog grejača došlo do varničenja (tipa slabih i umerenih električnih pražnjenja) i dalo potpuno neočekivane rezultate. Čak i da se izuzme acetilen iz razmatranja odnosi gasova bi prema Duvalovom trouglu pokazali termički kvar na višim temperaturama.

U ogledima na 700 °C i 1000 °C se uočava pojava acetilena u manjim količinama. Količina acetilena bi trebala biti zanemariva u odnosu na etilen. Moguće je da je i u ovom slučaju bilo varničenja. Odnosi gasova na 1000 °C ako se zanemari acetilen bi mogli biti prihvatljivi.

S obzirom na prethodno navedeno rezultati ovog ogleda nisu pouzdani za određivanje odnosa gasova za termičke kvarove.

2.2 Grejač od legure Khantal A-1

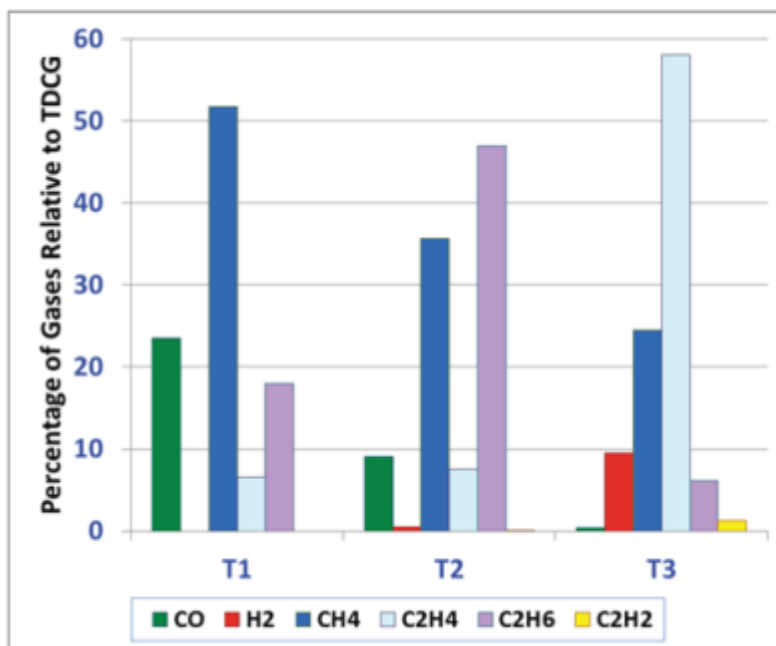
U ovom ogledu [2] se koristila legura Khantal A-1 [3]. Temperatura topljenja legure Khantal A-1 je 1500 °C. Grejač od žica legure Khantal A-1 je prečnika 0.6 mm koja je namotana na valjak za peći prečnika 6 mm. Koriste se mineralno izolaciono ulje tipa Gemini X i ulje Diala S4 ZX-I koje je dobijeno iz gasa odgovarajućim postupkom (gas to liquid). Na slici 5 je prikazana skica ogleda.



Slika 5: Skica izvedbe ogleda [2]

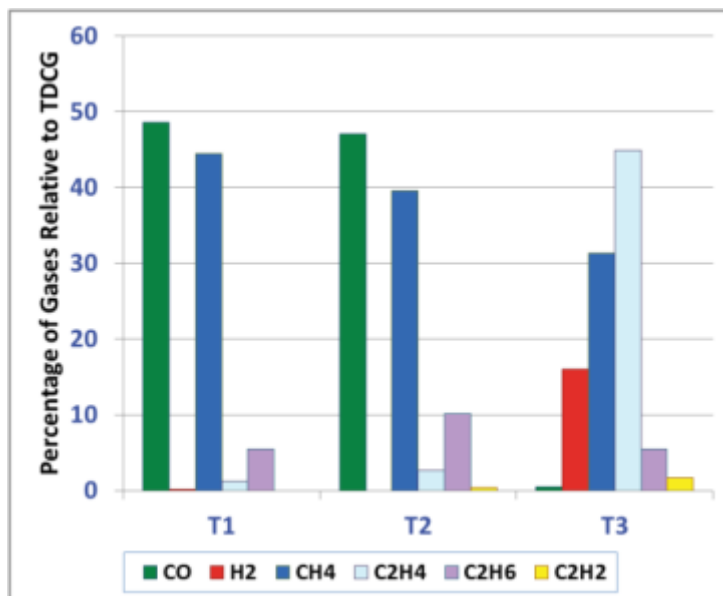
Temperatura je kontrolisana ulaznom snagom i merena termoparom postavljenim u sredinu grejnog elementa. Merena temperatura bi trebalo da odražava temperaturu najtoplije tačke ulja. Termički kvar tipa T1 je simuliran na oko 280 °C u trajanju od 40 minuta i termički kvar tipa T2 je simuliran na oko 400 °C u trajanju od 12 minuta. Povećanjem snage grejanja deo grejne žice je počeo da se žari (crveni) i topi, a s obzirom da je tačka topljenja legure Khantal A-1 1500 °C [3] to se podrazumevalo kvarom tipa T3 u trajanju od nekoliko sekundi do pola minuta. Vidno žarenje (crvenilo) čvrstih materijala usled grejanja se javlja na preko 500 °C.

Na slici 6 su prikazani postoci pojedinih gasova u odnosu na ukupnu količinu gorivih gasova za ulje Diala S4 ZX-I [2].



Slika 6: Postoci gasova u odnosu na ukupnu količinu gorivih gasova za ulje tipa Diala S4 ZX-I [2]

Na slici 7 su prikazani postoci pojedinih gasova u odnosu na ukupnu količinu gorivih gasova za ulje tipa Gemini X [2].



Slika 7: Postoci gasova u odnosu na ukupnu količinu gorivih gasova za ulje tipa Gemini X [2]

Kod oba tipa ulja se za teremički kvar tipa T2 na temperaturi od oko 400 °C stvara mala količina acetilena što nije očekivano na nižim i srednjim temperaturama. Zbog odstupanja temperatura ispitivanja od uobičajenih 300 °C i 700 °C odnosi gasova dobijeni ovim ogledom se ne mogu koristiti za određivanje odnosa gasova za termičke kvarove.

Ispitivanja [4] su pokazala da na osnovu teorije ključanja bazena (pool boiling theory) nije moguće u uslovima grejanja ulja u posudi sa uronjenim grejačem obaviti zagrevanje mineralnog izolacionog ulja na temperaturama većim od 330 °C za tip ulja Gemini X, a za sintetički ester MIDEL 7131 većim od 390 °C. Postoje tri područja grejanja: prirodna konvekcija, nukleatno ključanje (nucleate boiling) i film ključanje (film boiling). U području prirodne konvekcije temperatura grejnog elementa raste sa povećanjem ulazne snage. U području nukleatnog ključanja temperatura grejnog elementa je skoro konstantna sa povećanjem ulazne snage. Višak energije se rasipa isparavanjem i jakom konvekcijom ulja. Kad ulazna snaga pređe tačku kritičnog toplotnog fluksa (CHF) raspodela temperature duž grejnog elementa postaje nehomogena i temperatura vruće tačke dostiže temperaturu pregaranja grejnog elementa. Na slici 8 su date fotografije tri područja grejanja.

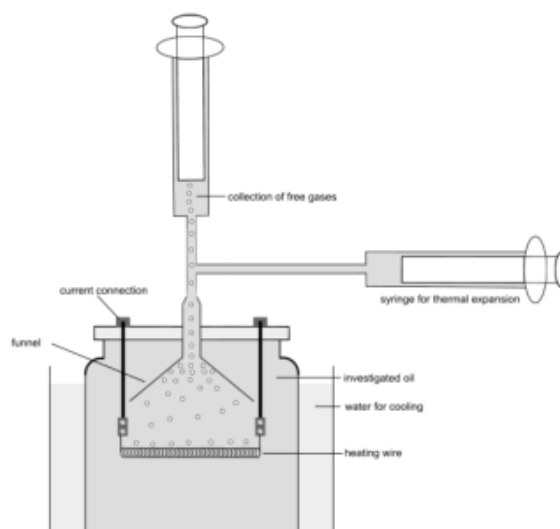


Slika 8: Blaga konvekcija (levo), jaka konvekcija i isparavanje (sredina) i nehomogeno zagrevanje (desno) [4]

Sa značajnim povećanjem ulazne snage (preko 300 W do 1200 W) ne povećava se temperatura u sredini grejnog elementa gde se nalazi termopar, ali dolazi sigurno do značajnog zagrevanja ulja oko grejnog elementa. U unutrašnjosti nosača grejnog elementa ne dolazi do povećanja temperature zbog bržeg odvođenja toplote usled isparavanja i jake konvekcije ulja. Bez obzira što termopar ne pokazuje povećanje temperature ulja ona sigurno raste, ali zbog isparavanja i jake konvekcije ulja, ulje ne može da se zagreje na željenu temperaturu koju uostalom i ne možemo na ovaj način utvrditi i koja je sigurno nehomogena duž grejnog elementa. Bolje je, iako sa greškom zbog nehomogenosti, koristiti merenje otpornosti grejnog elementa tokom ispitivanja kao što je urađeno u tački 2.1.

2.3 Grejač od legure Resistherm NiFe30

U ovom ogledu [5] se koristila legura Resistherm NiFe30 [6]. Maksimalna radna temperatura legure Resistherm NiFe30 u vazduhu je 800 °C. Prečnik provodnika je 0.6 mm, a dužina zavisno od željene snage je od 100 mm do 500 mm. Koriste se mineralno izolaciono ulje tipa Lyra X i prirodni ester FR3. Na slici 9 je prikazana skica ogleda.



Slika 9: Skica izvedbe ogleda [5]

Srednja temperatura je određena merenjem struje i napona. Za prirodni ester FR3 su ispitivanja izvršena na temperaturama 300 °C, 400 °C, 500 °C i 600 °C za različite dužine trajanja da bi se dobile značajne količine gasova. Za mineralno ulje Lyra X su ispitivanja izvršena na temperaturama 300 °C i 400 °C. Veće temperature nisu mogle biti dostignute slično kao i u tački 2.1. jer je dolazilo do topljenja grejnog elementa. Očigledno je da zbog razlika u fizičkim i hemijskim karakteristikama prirodnog estera i mineralnog ulja ne može da se na ovaj način na višim temperaturama ispita mineralno ulje, a pokazalo se da mineralno ulje Lyra X na 400 °C proizvodi 6 puta više slobodnih gasova od prirodnog estera FR3. U tabeli I su rezultati GH analiza prirodnog estera FR3 [5].

Tabela I: AGRU prirodnog estera FR3 [5]

Količina gasova u ppm	300 °C (6h)	400 °C (6h)	500 °C (2h)	600 °C (1h)
H ₂	92	278	472	382
CH ₄	33	214	351	453
C ₂ H ₂	<1	<1	<1	<1
C ₂ H ₄	27	209	631	1061
C ₂ H ₆	489	934	1005	1307
CO	932	4219	3095	5148
CO ₂	1353	2973	3698	3923
C ₃ H ₆	17	354	675	1158
C ₃ H ₈	27	439	866	1520

U tabeli II su rezultati GH analiza mineralnog izolacionog ulja Lyra X [5].

Tabela II: AGRU mineralnog izolacionog ulja Lyra X [5]

Količina gasova u ppm	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
300 °C (1.5 h)	11	20	<1	8	2	510	57
400 °C (1 h)	70	149	38	198	7	687	169

Iako se smatra da se acetilen pojavljuje na temperaturama većim od 500 °C u tabeli I ga nema ili je u tragovima. Rezultati i odnosi gasova dobijeni ovim laboratorijskim ispitivanjem za prirodni ester FR3 se mogu smatrati ispravnim i koristiti u različitim metodama za interpretaciju rezultata AGRU.

U tabeli II se za mineralno izolaciono ulje Lyra X kod temperature od 400 °C stvara acetilen što je neočekivano za tu temperaturu. Očigledno postoji problem sa nukleatnim ključanjem gde temperature na nekim mestima na grejnom telu dostižu veoma visoke vrednosti. Količine i odnosi gasova na 300 °C bi se mogli smatrati pouzdanim iako odstupaju od granice u Duvalovom trouglu 1.

2.4 Prednosti i nedostaci ispitivanja korišćenjem grejnih tela uronjenih u izolacionu tečnost

Prednost ispitivanja korišćenjem grejača je:

- Jednostavna izvedba sa jednostavnim grejačem i jednostavnom opremom.

Nedostaci oponašanja termičkih kvarova korišćenjem grejnih tela uronjenih u izolacionu tečnost su:

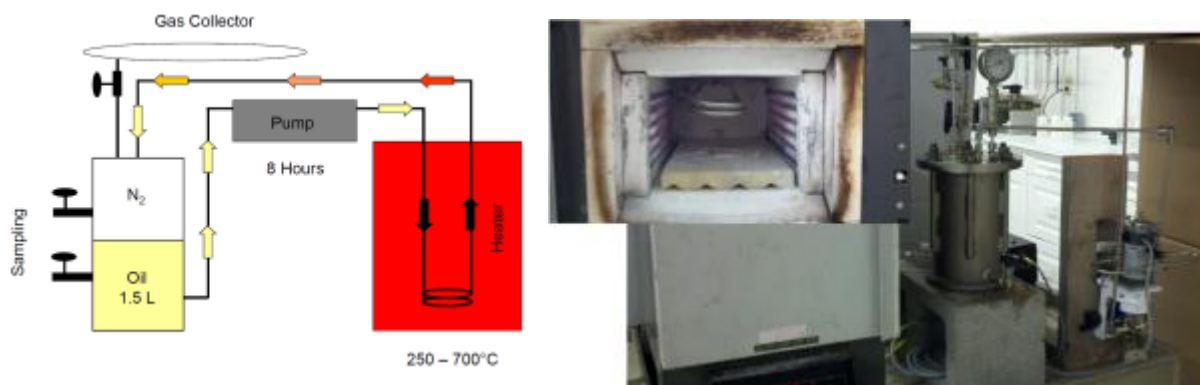
- Saglasno teoriji ključanja bazena onemogućeno je dostizanje stabilnih homogenih temperatura viših od 300 °C kod ispitanih mineralnih izolacionih ulja.
- Saglasno teoriji ključanja bazena onemogućeno je dostizanje stabilnih homogenih visokih temperatura kod ispitnog tipa prirodnog estera.

- Korišćenje termopara ugrađenog u nosač grejača je lošija opcija u odnosu na određivanje temperature grejača iz merenja struje i napona ili otpornosti.
- Određivanje temperature iz merenih struja i napona ili merenjem otpornosti je nepouzđano u područjima nukleatnog ključanja i film ključanja jer se, po prikazanim rezultatima ispitivanja, u tom području javljaju nehomogene temperature na grejaču koje mogu dostizati i veoma visoke temperature iako se određivanjem temperature iz struje i napona ili merenjem otpornosti dobijaju manje temperature.

Zbog visokih temperatura neophodno je kod ispitivanja upotrebom grejača obezbediti veoma dobre kontakte između delova opreme proticane električnom strujom kako bi se izbeglo pregrevanje i varničenje na kontaktima koji mogu da pokvare rezultate AGRU.

3 ANALIZA OPONAŠANJA TERMIČKIH KVAROVA U LABORATORIJSKIM USLOVIMA KORIŠĆENJEM PEĆI

Oponašanje termičkih kvarova u laboratorijskim uslovima za temperature od 250 °C do 700 °C korišćenjem električne peći sa nezavisnim grejanjem u kojoj se nalazi posuda sa izolacionom tečnošću je prikazano na jednom primeru. Ispitivani su prirodni estri i mineralno izolaciono ulje. Ispitivana količina izolacione tečnosti je 1.5 litara. Na slici 10 je data skica izvedbe ogleda i fotografija opreme.



Slika 10: Skica izvedbe ogleda (levo) i fotografija (desno) [7]

Pri temperaturi ispitivanja za prirodne estre na 700 °C je zapremina proizvedenih gasova prelazila 100 litara [8]. Zbog toga je neophodno u slučaju ponavljanja sličnog ispitivanja obratiti pažnju da su proizvedeni gasovi zapaljivi.

U tabeli III su dati rezultati AGRU sa količinama gasova za sojino ulje, a u tabeli IV za mineralno ulje nepoznatog tipa [8].

Tabela III: Količine gasova za sojino ulje u ppm i ukupna količina gasova u litrama [8]

T (°C)	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
H ₂	183	242	453	448	14578	92064	449630	951663	1898615	5336773
CH ₄	9	18	36	163	5427	32265	426389	2555117	5176221	15591740
C ₂ H ₆	321	404	495	896	12584	46790	518002	2666376	5163518	11721018
C ₂ H ₄	2	3	9	59	12620	66570	549371	6377429	13599997	37426253
C ₂ H ₂	0	0	0	0	0	0	0	3573	8213	33494
CO	138	250	388	1267	159834	846321	4476588	8535474	9782953	15715859
CO ₂	528	565	660	1324	150631	663328	3110067	5863817	6839063	9506162
Zapremina (litara)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	4.3	13.4	25.5	48.7	126.9

Tabela IV: Količine gasova za mineralno ulje u ppm i ukupna količina gasova u litrama [8]

T (°C)	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700
H ₂	0	61	65	66	308	635	3415	112760	1349634	7248321
CH ₄	15	32	77	82	281	1135	14060	525596	5562060	18288865
C ₂ H ₆	0	9	9	17	181	606	7688	403924	2989009	7135061
C ₂ H ₄	0	0	2	3	26	502	8254	528885	5156563	15505831
C ₂ H ₂	0	0	0	0	0	0	0	0	1506	4140
CO	54	60	77	224	23192	550591	4251527	4052783	7611417	12554248
CO ₂	1003	1346	1281	1822	13839	489273	3195203	3181084	4581705	7989692
Zapremina (litara)	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	2.8	26.2	67.7

Količina svakog gasa u tabelama III i IV je kombinovana količina izmerenih vrednosti količina gasova iz gasa i iz gasa rastvorenog u ulju. Količine koje prelaze 1000000 ppm nisu računski greška već prikazuju činjenicu da je proizvedena zapremina gasa daleko veća od početne zapremine ulja. U visokonaponskoj opremi i uređajima je očekivano da je samo mala količina ukupne izolacione tečnosti podvrgnuta te da bi količine gasova bile nekoliko veličina manje nego kod laboratorijskog ispitivanja.

U [8] nije navedeno da li su se koristili Ostvaldovi (Ostwald) koeficijenti u određivanju kombinovane količine gasova prikazanih u tabelama III i IV.

Primenjivost odnosa gasova prikazanih u tabelama III i IV je sumnjiva jer je nepoznato koje ulje je korišćeno i kakvo je stanje ulja (ostarelo, vlaga, zasićenost kiseonikom i azotom, prisustvo inhibitora starenja,...) iako približno odgovaraju granicama u Duvalovom trouglu 1 za mineralno ulje na 700 °C, ali ne odgovara na 300 °C. Granice za prirodne estre su takođe neodgovarajuće prema Duvalovim trouglovima 3.

3.1 Prednosti i nedostaci ispitivanja korišćenjem peći

Prednost ispitivanja korišćenjem peći je:

- Mogućnost dostizanja visokih temperatura ispitivanja izolacionih tečnosti.
- Precizno određivanje temperature pomoću senzora u peći.

Nedostaci oponašanja termičkih kvarova korišćenjem peći u prikazanom primeru su:

- Pri visokim temperaturama ispitivanja od oko 700 °C se stvaraju izuzetno velike količine slobodnih gasova koji su zapaljivi.
- Korišćenje ukupne količine izolacione tečnosti za zagrevanje.

4 ZAKLJUČAK

Korišćenje grejača za određivanje količina i odnosa gasova AGRU u laboratorijskim uslovima je ograničena na niže temperature do oko 300 °C za mineralna ulja, a za prirodne estre nešto više temperature. Sama priprema ispitivanja mora da obezbedi da ne dolazi do „zagađenja“ izolacione tečnosti gasovima čiji su izvor loši kontakti ili nehomogenost grejača.

Korišćenje peći je primenjivo u kompletnom opsegu temperatura do oko 700 °C. U prikazanom primeru je na željenu temperaturu zagrevana kompletna količina izolacione tečnosti kruženjem kroz peć, a poželjno bi bilo da se na željenu temperaturu zagreje samo mala količina koja se nalazi u peći

koja bi prirodnom kruženjem (kao u transformatorskim radiatorima) prelazila u sud sa većom količinom izolacione tečnosti dok bi sa druge strane ulazila izolaciona tečnost iz suda. Drugi način je da se u peći zagreje količina ulja u cevi u peći na željenu temperaturu u određenom vremenu, a onda prebaci u sud sa ukupnom količinom ulja. Na neki od ovih načina bi se dobili uslovi slični onom u pravom transformatoru jer kod mesta grejanja koje je okruženo izolacionom tečnošću postoji kretanje izolacione tečnosti usled razlike u temperaturama mesta grejanja i okolne izolacione tečnosti, a takođe i zbog kretanja tečnosti usled različitih načina hlađenja transformatora. Senzor temperature bi trebao da bude u dodiru sa izolacionom tečnošću unutar cevi. Količina izolacione tečnosti u sudu bi trebala biti relativno velika kako bi se gasovi stvoreni grejanjem otopili u izolacionoj tečnosti, a ne izdvajali u gasnom stanju. Zbog oponašanja pregrevanja izolacione tečnosti u transformatoru bolje bi bilo da se koristi samo AGRU izolacione tečnosti i da se ti rezultati uzimaju u obzir kod određivanja odnosa gasova termičkih kvarova bez obzira koja je količina otišla u gasno stanje.

Bilo bi poželjno ispitati različite tipove izolacionih tečnosti oponašanjem termičkih kvarova tako da isti tip izolacione tečnosti ima različite karakteristike (ostarelo, vlaga, zasićenost kiseonikom i azotom, prisustvo inhibitora starenja,...) u temperaturnom opsegu saglasno mogućnostima laboratorije.

5 LITERATURA

- [1] Jackelyn Aragón Gómez, 2014, Dissertation "Experimental Investigations on the Dissolved Gas Analysis Method (DGA) through Simulation of Electrical and Thermal Faults in Transformer Oil", Institute für Angewandte Analytische Chemie Fakultät Chemie der Universität Duisburg-Essen
- [2] X.F. Wang, Z.D. Wang, Q. Liu, Ch. Krause, P.W.R. Smith, D. Walker, 2015, „Dissolved gas analysis of a gas to liquid hydrocarbon transformer oil under thermal faults”, The 19th International Symposium on High Voltage Engineering, Pilsen, Czech Republic, August, 23 – 28
- [3] <https://www.kanthal.com/en/products/material-datasheets/wire/resistance-heating-wire-and-resistance-wire/kanthal-a-1/> (pristupljeno 11.01.2023. godine)
- [4] Wang, X. F., Wang, Z. D., Liu, Q., & Dyer, P., 2018, „Dissolved gas analysis of thermal faults in transformer liquids simulated using immersed heating method“, IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 25(5), 1749- 1757
- [5] M. Jovalekic, D. Vukovic, S. Tenbohlen, 2014, "Dissolved gas analysis of alternative dielectric fluids under thermal and electrical stress." in IEEE Conf. Dielectr. Liquids (ICDL), pp. 1-4
- [6] https://www.isabellenhuetten.de/fileadmin/Daten/Praezisionslegierungen/Datenblaetter_Widerst and/Englisch/RESISTHERM.pdf (pristupljeno 11.01.2023. godine)
- [7] C. Beauchemin, 2017, "Understanding Dissolved Gas Analysis of Ester Fluids“, The international conference on power transformers – TRANSFORMER 17, Torun, 9-11 may 2017, pp. 93-112
- [8] Dave Hanson, Kevin Li, Jorge Plascencia, John Luksich, Art Lemm, Clair Claiborne, Don Cherry, George Frimpong, Russell Martin, 2013, "Understanding Dissolved Gas Analysis of Ester Fluids: a Review of Gas Generated in Ester Fluid by Stray Gassing, Thermal Decomposition and Electrical Discharge“, Advanced Research Workshop on Transformers. 28 -30 October 2013. Baiona– Spain