



## RAZMATRANJE DUVALOVIH TROUGLOVA 2 ZA REGULACIONE SKLOPKE CONSIDERATION OF DUVAL TRIANGLES 2 FOR ON-LOAD TAP CHANGERS

Siniša SPREMIĆ, Elektrodistribucija Srbije, TC Novi Sad, Srbija

### KRATAK SADRŽAJ

Transformatori sa regulacijom napona pod opterećenjem imaju regulacione sklopke sa sudom prekidačkog dela odvojenim od suda transformatora. Sud prekidačkog dela je punjen izolacionim uljem. Prilikom promene položaja regulacione sklopke u prekidačkom delu dolazi do varničenja kojim se stvaraju gasovi u odgovarajućim odnosima. Za različite tipove regulacionih sklopki odnosi gasova mogu biti različiti. Pored toga mogu se zbog neke vrste kvarova dobiti odnosi gasova koji ne odgovaraju normalnom radu regulacione sklopke. Zbog toga su do sada za neke tipove regulacionih sklopki prikupljeni podaci koji su analizirani i na osnovu toga su određena područja normalnog rada u Duvalovim trouglovima 2. Ovde se razmatraju Duvalovi trouglovi 2, daju primeri i ukazuje na moguće greške kod interpretacije rezultata u Duvalovim trouglovima 2.

**Ključne reči:** Duvalovi trouglovi 2, gasovi, prekidački deo, regulaciona sklopka, transformator

### SUMMARY

Transformers with voltage regulation under load have on-load tap changers with a diverter switch compartment separated from the transformer vessel. The diverter or selector switch compartment is filled with insulating oil. When changing the position of the on-load tap changer in the diverter or selector switch compartment, there is sparking which creates gases in appropriate proportions. Gas ratios may be different for different types of on-load tap changers. In addition, due to some types of faults, gas ratios that do not correspond to the normal operation of the on-load tap changer can be obtained. Therefore, so far, data have been collected for some types of on-load tap changers, which have been analyzed and based on that, areas of normal operation in Duval triangles 2 have been determined. Duval triangles 2 are considered here and possible errors in the interpretation of the results in Duval triangles 2 are pointed out.

**Key words:** Diverter or selector switch, Duval triangles 2, Gases, On-Load Tap Changer, Transformer

Siniša Spremić, Bulevar oslobođenja 100, 21000 Novi Sad, Srbija, sinisa.spremic@ods.rs

### 1. UVOD

Metode za analizu gasova rastvorenih u ulju (u daljem tekstu: AGRU) transformatora se koriste i razvijaju već oko pet decenija. I nakon toliko vremena nema metode za AGRU koja sa potpunom sigurnošću može odrediti vrstu kvara. Može se uočiti da su novije metode za AGRU mnogo tačnije nego starije, poređenjem postotka tačnih interpretacija rezultata AGRU [1]. To su slučajevi gde je obavljen detaljan pregled nakon kvara sa fotografijama ili su vršene učestale AGRU ili se vrši stalno praćenje AGRU ili su vršena različita ispitivanja koja potvrđuju kvar, nekad i više navedenih stavki zajedno. Pored AGRU transformatorskog ulja vršene su i AGRU ulja iz suda regulacionih sklopki. Duval je predstavio novi trougao [2] za ulje suda regulacionih sklopki koji je napravljen na osnovu većeg broja obavljenih AGRU koji se danas naziva Duvalov trougao 2. Uočeno je i da se količine i odnosi gasova menjaju u zavisnosti od tipa regulacione sklopke, od opterećenja i od stanja ulja u sudu regulacione sklopke. Na osnovu toga je napravljen dodatni Duvalov trougao 2a za ulje suda regulacionih sklopki sa dodatnim područjima normalnog rada za određene tipove regulacionih sklopki.

Ovde se daju neka razmatranja mogućih uzroka odstupanja područja normalnog rada i mogućih grešaka kod interpretacije rezultata AGRU korišćenjem Duvalovih trouglova 2.

Samo daljim razmatranjima rezultata AGRU i detaljnim pregledima regulacionih sklopki sa kvarom i bez kvara može da se dođe do novih zaključaka i poboljšanja postojećih metoda za interpretacije rezultata AGRU regulacionih sklopki.

## 2. DUVALOVI TRUGLOVI ZA REGULACIONE SKLOPKE

U upotrebi je veliki broj tipova regulacionih sklopki različitih proizvođača i različitih izvedbi.

Klasifikacija regulacionih sklopki po načinu izvedbe je data u tabeli 1 [3].

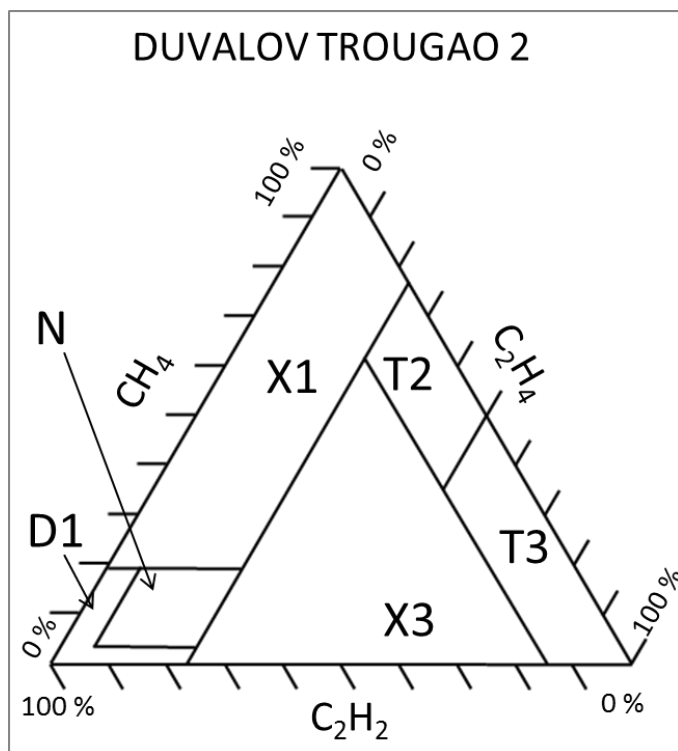
Tabela 1 – Klasifikacija regulacionih sklopki po načinu izvedbe

<b>A</b>	Prekidanje luka u ulju usled struja opterećenja prilikom promene položaja regulacione sklopke		
<b>V</b>	Vakuumske boce za prekidanje luka usled struja opterećenja prilikom promene položaja regulacione sklopke		
	<b>R</b>	Otpornik za prebacivanje struja prilikom promene položaja regulacione sklopke (otpornički tip)	
	<b>X</b>	Reaktansa za prebacivanje struja prilikom promene položaja regulacione sklopke (reaktansni tip)	
		<b>S</b>	Prekidački deo i birački deo u odvojenim sudovima (Separate)
		<b>C</b>	Prekidački i birački deo u istom sudu (Combined)

Do sada su se za interpretaciju rezultata AGRU pojavili Duvalov trougao 2 i Duvalov trougao 2a.

### 2.1 Duvalov trougao 2

Duvalov trougao 2 je prikazan na slici 1. Pored slike 1 je data legenda sa kratkim opisom područja u Duvalovom trouglu 2.



Legenda:

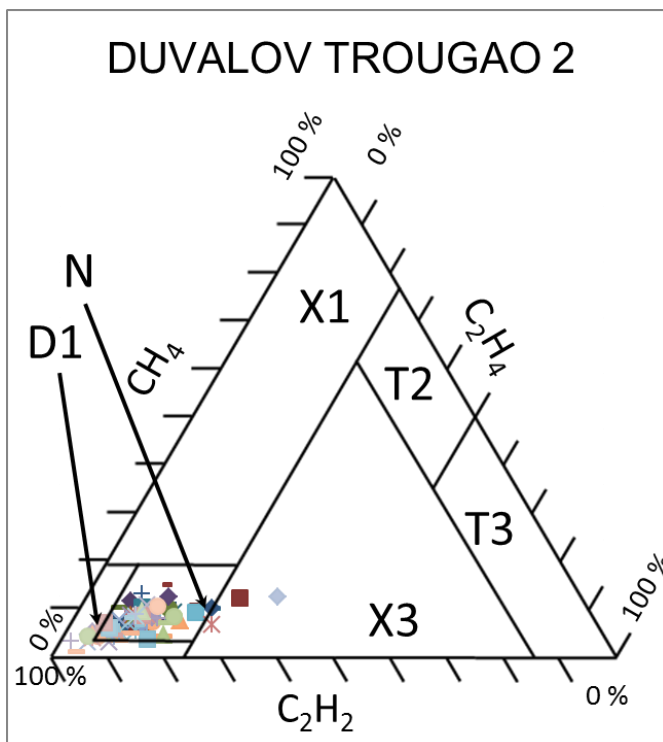
- N – normalan rad
- T2 – Termički kvar  $300\text{ }^{\circ}\text{C} < T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$
- T3 – Termički kvar  $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$
- X1 – Kvarovi T3/T2 u napredovanju
- X3 – Ne prirodno električno pražnjenje
- D1 – Ne prirodno električno pražnjenje D1
- $\text{C}_2\text{H}_2$  – Acetilen
- $\text{CH}_4$  – Metan
- $\text{C}_2\text{H}_4$  – Etilen

Razlika između područja X3 i D1 je u tome da područje X3 obuhvata kvarove jakih električnih pražnjenja tipa D2, a područje D1 slabih električnih pražnjenja tipa D1.

Slika 1 – Duvalov trougao 2

Kod nekih tipova regulacionih sklopki većina rezultata AGRU upada u područje normalnog rada “N”. Kasnije AGRU ulja iz suda regulacionih sklopki su pokazale da se u određenim slučajevima tačke nalaze izvan područja “N”. Vizuelnim pregledom prekidačkog ili prekidačko-biračkog dela regulacionih sklopki u slučaju da se tačka nalazi izvan područja “N” Duvalovog trougla 2 nisu uočeni nedostaci. Zbog toga su određena nova područja koja označavaju područja normalnog rada. Kod regulacionih sklopki kod kojih postoji prekidanje luka u ulju suda regulacionih sklopki uzroci za pojavu novih područja su prepoznati u većem opterećenju, stanju ulja i većem broju promena položaja regulacione sklopke. Kod vakuumskih regulacionih sklopki, kod kojih nema prekidanja struja (luka) u ulju suda regulacione sklopke, normalno područje rada za neke tipove ne uključuje područje “N” u Duvalovom trouglu 2 već potpuno novo područje.

Na slici 2 su prikazani rezultati AGRU regulacionih sklopki ARS po klasifikaciji iz Tabele 1 sa područja Elektrodistribucija Srbije TC Novi Sad. Uzorci su uzeti pre početka rada na remontu/reviziji prekidačkog dela regulacione sklopke. Podrobnim pregledom prilikom radova nije uočen nikakav problem na prekidačkim delovima regulacionih sklopki.



Slika 2 – Rezultati AGRU regulacionih sklopki tipa ARS

Kod regulacionih sklopki normalan rad podrazumeva pojavu slabijih električnih pražnjenja tipa D1 tako da i područje “D1” u Duvalovom trouglu 2 treba da bude područje normalnog rada. Pregled prekidačkog dela regulacionih sklopki je kod nekoliko tačaka koje se nalaze u području “X3” Duvalovog trougla 2 takođe pokazao da nema nikakvih vidljivih problema.

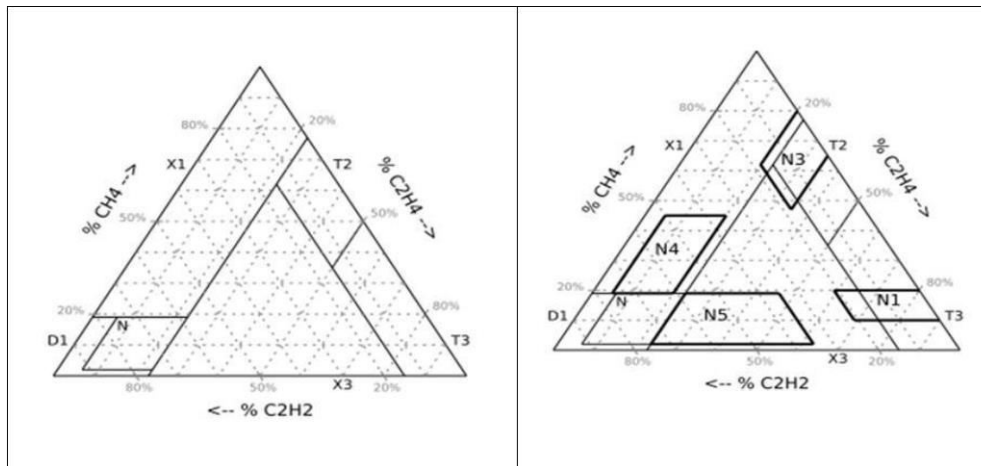
Količina ulja u sudu transformatora je 50 do 100 puta veća nego u sudu prekidačkog dela ili prekidačko-biračkog dela regulacione sklopke, zavisno od tipa, starosti i primene transformatora. Može se pretpostaviti da će vruća tačka u transformatoru proizvesti 100 ppm etilena što se ne smatra opasnim. Ista vruća tačka u prekidačkom ili prekidačko-biračkom delu regulacione sklopke će proizvesti 5000 do 10.000 ppm što se može smatrati sumnjivim. Ova količina etilena će pomeriti tačku u Duvalovom trouglu 2 u područja koja se smatraju područjima greške ili kvara za regulacionu sklopku. Isto poređenje se može dati za metan. Za regulacione sklopke klasifikacije ARS, ARC, AXS i AXC se položaj tačke izvan područja “N” ili područja nagomilavanja za određeni tip može smatrati kao mogući problem pregrevanja.

Za tipove regulacionih sklopki sa normalno velikim vrednostima acetilena oprez treba biti prisutan u svakom slučaju kada se tačka nalazi izvan područja “N”.

Za tipove regulacionih sklopki sa normalno malom proizvodnjom acetilena tačke koje se nalaze dalje od područja “N” ne moraju biti smatrane opasnim pregrevanjem.

## 2.2 Duvalov trougao 2a

Dugoročnim prikupljanjem podataka AGRU regulacionih sklopki uočeno je da različiti tipovi imaju različita područja normalnog rada. Na osnovu toga je napravljen Duvalov trougao 2a [5], prikazan na Slici 3 desno. Prigradne regulacione sklopke (compartment type) imaju sud regulacione sklopke prigraden na sud transformatora, a regulacione sklopke u sudu (in-tank type) imaju sud regulacione sklopke ugrađen u sud transformatora.



Slika 3 – Duvalov trougao 2 za prigradne sklopke (levo) i Duvalov trougao 2a za sklopke u sudu (desno) [5]

U tabeli 2 [4] su prikazani podaci o normalnom radu i radu sa greškom za različite tipove regulacionih sklopki čiji je sud ugrađen u sud transformatora.

Tabela 2 – Tipovi regulacionih sklopki i područja normalnog rada i rada sa greškom [4]

Tip	Normalan rad u području	Rad sa greškom u području
M	N, N1, N5	X3 (6 luk, 2 termička), T3 (6 termičkih)
R	N pa N1, N5 ili N4, često u N1	X3 (1 koksovanje), T2 (2 termička)
D	N1 ili N4	T2 (1 termički)
G	N ili N5	
T	N pa N1	
V	N	
VR	N3	
VV	N ili N3	T3 (1 termički)

Regulacione sklopke Elektrodistribucije Srbije na području TC Novi Sad rade sa opterećenjem koje je višestruko manje od nazivne struje regulacione sklopke. Ispitani su uzorci ulja iz suda regulacionih sklopki na 46 transformatora od kojih neki i više puta.

Tačke za tip M kojih je najviše uglavnom se nalaze u području “N” Duvalovih trouglova, nekoliko tačaka je u području “D1”, a jedna u području “N5” Duvalovog trougla 2a.

Tačke za tip D kojih imamo tri komada dve tačke se nalaze u području “N” i jedna u području “N5” u neposrednoj blizini područja “N” Duvalovog trougla 2a. Ovo je suprotno navedenom u tabeli 2.

Na Slici 4 levo su prikazani pokretni kontakti tipa D, u sredini nepokretni kontakti i desno pokretni kontakti tipa M. Tačke AGRU ovih sklopki su u “N” području Duvalovog trougla 2a. Obe su stare sa preko 200.000 promena položaja regulacione sklopke. Vršeni su redovni remont i zamene delova po preporuci proizvođača.



Slika 4 – Prikaz kontakata regulacionih sklopki

U [4] je prikazano nekoliko primera kvarova unutar suda regulacione sklopke. Jedan primer regulacione sklopke tipa M sa kvarom nalazi se blizu područja „N1“ koje je označeno kao područje normalnog rada. Da su samo malo drugačiji odnosi gasova moglo se dogoditi da se tačka nađe u području „N1“ iako ima prisutan termički kvar.

U [3] je navedeno da se relativno jednolika količina gasova stvara po promeni položaja prilikom normalnog rada regulacione sklopke što zavisi od klase regulacione sklopke sa prikazanim vrednostima za klase regulacionih sklopki. Navodi se da se veće količine gasova stvaraju u slučaju nenormalnog rada. Veće ukupne količine gasova se mogu stvoriti i prilikom normalnog rada što zavisi od tipa, ukupnog trajanja i nivoa snage (opterećenje i broj promena položaja) [4]. Do dodatnog odstupanja od “normalnih” vrednosti po promeni položaja regulacione sklopke može da dođe zbog ugljensanjanja ulja kod ARS klase regulacionih sklopki i to posebno kroz povećanje količine etilena [4].

U vakuumskim regulacionim sklopkama se stvaraju relativno male količine gasova u odnosu na uljne regulacione sklopke [3]. Na njihovo stvaranje utiče veći broj mehanički pokretanih električnih kontakata (cam-operated contacts) u sudu prekidačkog ili prekidačko-biračkog dela regulacione sklopke kod kojih može da dođe do zagrevanja ili malih varničenja.

### 3. ZAKLJUČAK

Duvalovi trouglovi 2 i 2a mogu da se koriste za interpretaciju rezultata AGRU regulacionih sklopki, ali uz veliki oprez jer tačka u Duvalovom trouglu 2 ili 2a može da pokaže „normalan rad“, a da postoji kvar. Može da se dogodi i obrnuto, da kvar ne postoji, a tačka u Duvalovom trouglu 2 ili 2a pokaže da je prisutan kvar. U slučaju da Duvalov trougao 2 ili 2a pokaže da je kvar prisutan postoji mogućnost da se korišćenjem metoda merenja dinamičkog otpora (DRM – Dynamic Resistance Measurement) ili vibroakustičnim merenjem (VAM – Vibro-Acoustic Measurement) podrži dijagnoza dobijena Duvalovim trouglom 2 ili 2a.

Postoji mogućnost da u nekom trenutku, zbog lošijeg naleganja kontakata ili ugljensanjanja (koksovanja) kontakata, dođe do grejanja koje kasnijim prebacivanjem položaja regulacione sklopke zbog trenja i udara kasnije nestane zbog povratka dobrog naleganja i skidanja (razbijanja) ugljensanjanog sloja. Gasovi koji se stvore zbog grejanja će u kasnijem odsustvu grejanja polako „ispariti“ disanjem preko sušionika vazduha.

Prilikom remonata i revizija regulacionih sklopki neophodno je izvršiti podroban vizuelni pregled u cilju uočavanja bilo kakvih nepravilnosti.

Samo dalje analize što većeg uzorka AGRU, dodatnih merenja i ispitivanja i podrobnih pregleda sumnjivih regulacionih sklopki mogu dovesti do unapređenja Duvalovih trouglova 2 ili do boljih načina interpretacije rezultata AGRU regulacionih sklopki.

### LITERATURA

- [1] Spremić S., “Unapređeni trougao i poređenje sa drugim metodama analize gasova rastvorenih u ulju”, 11. savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem (CIRED Srbija), rad 1.08, 2018.
- [2] Duval M., “The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers”, IEEE Elec.Insul.Magazine, Vol.24, No.6, pp. 22-29, 2008.

- [3] Technical brochure TB 443, DGA in Non-Mineral Oils and Load Tap Changers and Improved DGA Diagnosis Criteria, CIGRE Working Group D1.32, December 2010
- [4] Technical brochure TB 771, Advances in DGA interpretation, CIGRE Working Group D1/A2.47, July 2019
- [5] IEEE Transformer Committee (2015), IEEE Guide for Dissolved Gas Analysis in Transformer Load Tap-Changers, IEEE C57.139