

# Mogućnosti procjene stanja regulacione sklopke energetskog transformatora primjenom fazi logike u analizi gasova rastvorenih u ulju

Nada Cincar, Srđan Jokić  
Univerzitet u Istočnom Sarajevu  
Elektrotehnički fakultet

[nada.cincar@etf.ues.rs.ba](mailto:nada.cincar@etf.ues.rs.ba), [srdjan.jokic@etf.ues.rs.ba](mailto:srdjan.jokic@etf.ues.rs.ba),

Zlatan Stojković  
Elektrotehnički fakultet  
Univerzitet u Beogradu  
[zstojkovic@etf.ues.rs.ba](mailto:zstojkovic@etf.ues.rs.ba)

**Sažetak—** U eksploataciji elektroenergetskih transformatora se nalazi značajan broj regulacionih sklopki i njihova preventivna kontrola i održavanje zaslužuju pažnju. Jedna od metoda za dijagnostiku stanja regulacione sklopke energetskog transformatora je metoda analize gasova rastvorenih u ulju (eng. Dissolved Gas in oil Analysis - DGA), kojom se mogu otkriti greške kao što su parcijalna pražnjenja, pojava luka, kao i povećana kontaktna otpornost. Primjena vještačke inteligencije i fazi logike u interpretaciji rezultata je od velikog značaja, jer ubrzava proces donošenja odluka mogućnošću spašavanja rezultata i pravljjenjem baze podataka svih dobrih i loših stanja. U radu je predstavljena DGA metoda, primjer konkretne primjene fazi logike u okviru programskog paketa Matlab, kao i prijedlog dalje akcije na osnovu ove metode.

**Ključne riječi-** regulaciona sklopka; DGA; fazi logika; dijagnostika.

## I. UVOD

U eksploataciji elektroenergetskih transformatora se nalazi značajan broj regulacionih sklopki i njihova preventivna kontrola i održavanje zaslužuju pažnju. Najveći broj otkaza energetskih transformatora povezan je sa regulacionom sklopkom. Nastali kvarovi često imaju teške posljedice, zahtijevaju skupu i dugotrajnu opravku, a i održavanje je relativno skupo. Manja pouzdanost rada energetskih transformatora sa regulacionom sklopkom potiče usljed povećanja broja kontakata i spojeva na kojima uvećani prelazni otpori mogu dovesti do lokalnih pregrijavanja, a na to se nadovezuje i činjenica da takav energetski transformator prestaje da bude čisto statički aparat, bez pokretnih dijelova.

Regulaciona sklopka pod opterećenjem je ujedno i najsloženiji dio transformatora, izložen različitim faktorima degradacije i uticaja pa je za procjenu njenog stanja razvijen veći broj dijagnostičkih metoda. Postoje razne metode za ocjenu stanja regulacione sklopke ili transformatora u cjelini (hemijske, električne, optičke, akustičke i mehaničke). Može se reći da je broj dijagnostičkih metoda za određivanje stanja regulacione sklopke prilično velik. Primjena svih poznatih dijagnostičkih metoda predstavlja bi izuzetno zahtjevan,

skup i vremenski dugotrajan proces koji u većini slučajeva ne bi bio isplativ [1].

## II. REGULACIONA SKLOPKA ENERGETSKOG TRANSFORMATORA

Regulaciona sklopka (engl. Tap Changer) transformatora je namijenjena za regulaciju naponskih prilika u mreži promjenom prenosnog odnosa, tj. promjenom položaja izvoda regulacionih namotaja duž glavnih transformatorskih namotaja. Pomoću regulacione sklopke može se kontrolisati i tok aktivne i reaktivne energije, a takođe se koristi za faznu regulaciju u transformatorima koji pomjeraju fazu [2].

Fizička veličina regulacionih sklopki zavisi od veličine transformatora, odnosno od njegovog nominalnog napona i instalisane snage [3]. Regulaciona sklopka se pokreće pomoću složenog pogonskog mehanizma, a njima se može upravljati ručno u transformatoru ili iz kontrolne udaljene sobe.

Po svojoj namjeni regulacione sklopke se mogu podijeliti na sklopke sa regulacijom bez opterećenja (engl. *off-load*) i sklopke sa regulacijom pod opterećenjem (engl. *on-load*). Regulacija bez opterećenja se uglavnom koristi na transformatorima manjih snaga, niskonaponskih transformatora, dok je za veće naponske nivoe i veće snage uglavnom neophodna besprekidna regulacija pod opterećenjem.

Različiti izvodi regulacione sklopke su na različitom naponu, i direktnim povezivanjem te dvije tačke određeni broj navojaka namotaja bi se kratko spojio što bi rezultovalo velikom vrijednošću cirkulacione struje. Prema tome, opterećenje mora biti fizički prekinuto ručno, za vrijeme prebacivanja položaja *off-load* regulacione sklopke, a zatim prebačeno na novi izvod. U tom slučaju dolazi do prekidanja napajanja, pa se ova vrsta regulacionih sklopki uglavnom primjenjuje u distribuciji, gdje se zastoji u napajanju električnom energijom u određenoj mjeri mogu tolerisati [2]. Pozicija *off-load* regulacionih sklopki se obično definiše i podešava pri montaži samog transformatora i u puštanju u

pogon, mada se može i kasnije mijenjati, ali to se radi vrlo rijetko.

Regulacija napona bez opterećenja najčešće se sastoji od stepena regulacije sa 2,5% nazivnog napona, tipično realizovanih od 5 pozicija  $\pm$  2 koraka. Za transformatore sa regulacijom pod opterećenjem najčešći vid regulacije je sa stepenom od 1,25% sa opsegom od 17 do 33 pozicije za energetske transformatore. Transformatori sa većim brojem izvoda, kao što su ispravljački transformatori u industrijskim procesima (kao što je elektroliza pri dobijanju aluminijuma) koriste i veći broj, do 107 pozicija. Broj i korak regulacije je promjenljiv i zavisi od namjene i uslova u kojima će transformator raditi. U nekim primjenama je neophodna fina regulacija pa se stepen regulacije tada smanjuje ispod 1% i koristi se veći broj pozicija. Za primjenu u elektroenergetskoj mreži, korak od 1,25% ili 1,6% je mnogo češći. Upotreba regulacionih sklopki koje omogućavaju manji broj operacija tokom dana i zahtijevaju manji nivo održavanja je uglavnom opravdanija [4].

U mnogim slučajevima primjene energetskih transformatora, prekid napajanja potrošača električnom energijom, za vrijeme prebacivanja položaja regulacione sklopke je neprihvatljiv. Zato se transformatori opremaju sa skupljim i komplikovanijim regulacionim sklopkama, koje rade pod opterećenjem, takozvanim On Load Tap Changer (OLTC) mehanizmom. Za vrijeme prebacivanja položaja regulacione sklopke iz jednog položaja u drugi, kroz njene namotaje protiče struja koja se naziva struja komutacije. Dva bitna konstruktivna detalja koji prate prisustvo regulacione sklopke su [5]:

-postojanje neke vrste impedanse (koja se naziva tranziciona impedansa ili impedansa premošćenja, čija je uloga da spriječi kratko spajanje zavojaka regulacionog namotaja [6], i

-dvostruko strujno kolo, što omogućava da se struja prenosi jednim kolom dok se u drugom pokretni kontakt premješta u sljedeću poziciju.

Impedansa premošćenja može biti prigušnica ili otpornik, i u zavisnosti od toga govorimo o reaktivnom ili rezistivnom tipu regulacione sklopke. Prednost otpornika je što daje povoljnije uslove prekidanja struje, odnosno kraće trajanje luka i duži radni vijek kontakata.

U rezistivnom tipu regulacione sklopke promjena pozicije se mora veoma brzo izvesti kako bi se izbjeglo pregrijavanje tereta [7].

Kvarovi regulacione sklopke predstavljaju preko 40% kvarova koji se javljaju na energetskim transformatorima. Zbog toga je upravo analiza stanja regulacione sklopke izazvala sve veći interes kod elektroprivrednih i velikih industrijskih preduzeća. Razlozi povećanog interesa u prvom redu su želja za što boljim iskorišćenjem transformatora, zatim povećanje pouzdanosti sprečavanjem nastanka kvara te povećanje sigurnosti osoblja i bolja zaštita životne sredine [8]. Od velikog značaja u analizi stanja regulacione sklopke je identifikacija kvarova u najranijoj fazi, dok kvar nije uznapredovao i izazvao velike štete. Na taj način se izbjegavaju skupe posljedice velikih havarija.

### III. METOD GASNE HROMATOGRAFIJE

Metoda gasne hromatografije (engl. Dissolved Gas Analysis-DGA) odnosi se na dijagnostiku ulja i izolacije. Od samih početaka proizvodnje uljnih transformatora poznata je činjenica da se u transformatoru tokom pogona iz transformatorskog ulja mogu razvijati gasovi.

Pogonski gasni detektori proizvode se u više izvedbi, koje omogućavaju *on-line* praćenje od jednog do devet gasova u gasnom jastuku iznad ulja ili u samom ulju. Laboratorijska metoda hromatografske analize gasova iz uzoraka ulja ili gasa iz transformatora u pogonu standardizovana je metoda [9], dopunjena standardom [10], koja se odnosi na analizu gasova kod prijemnih ispitivanja novih transformatora. Propisani su uslovi ispitivanja i granice osjetljivosti i ponovljivosti. Sve faze analize svakodnevno se provjeravaju, jer moraju biti pod kontrolom ispitivača. Metoda iz [9] koristi se takođe za verifikaciju rezultata i kalibraciju pogonskih gasnih detektora, koji moraju postizati rezultate sljedive prema standardizovanoj metodi. Metode interpretacije uvodile su se i razvijale sa sve većim brojem ispitivanja na modelima i realnim objektima, pojedine su autorizovane, a iz više različitih metoda izrađen je standard.

#### A. Proces nastajanja gasova u ulju

Kao što je opisano u [11] gasovi nastaju degradacijom izolacionog sistema. Pod uticajem električnih i termičkih kvarova dolazi do kidanja veza C-C i C-H i stvaranja nestabilnih radikala ili jona, koji se vrlo brzo rekombinacijom vezuju u gasne molekule vodonika (H-H), metana (CH<sub>3</sub>-H), etana (CH<sub>3</sub>-CH<sub>3</sub>), etilena (CH<sub>2</sub>=CH<sub>2</sub>) i acetilena (CH≡CH), a u manjoj mjeri nastaju i gasovi sa 3 i 4 ugljenikova atoma. Brzina degradacije se značajno povećava ako je u transformatoru prisutna greška ili kvar. Gasovi koji su karakteristični za razgradnju izolacionog sistema su:

- ugljovodonici: metan (CH<sub>4</sub>), etan (C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>), etilen (C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>), acetilen (C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>) i vodonik (H<sub>2</sub>),
- ugljen oksidi: ugljen monoksid (CO) i ugljen dioksid (CO<sub>2</sub>),
- gasovi koji ne potiču od kvarova: kiseonik (O<sub>2</sub>) i azot (N<sub>2</sub>).

Svi ovi gasovi počinju se formirati na određenim, specifičnim temperaturama, prikazanim na Sl. 4. Na temperaturi, već oko 150 °C, u manjim količinama počinju se formirati vodonik i metan. Na oko 250 °C počinje stvaranje etana. Na oko 350 °C počinje stvaranje etilena. Acetilen počinje da se formira između 500 i 700 °C, što je jasno vidljivo na Sl. 3. Nekada prije je i samo malo prisustvo acetilena ukazivalo da se pojavila visoka temperatura od najmanje 700 °C. Međutim, otkrića u skorijoj prošlosti su dovela do zaključka da termički kvar (hot spot) na 500 °C može proizvesti manju količinu acetilena. Veća količina acetilena može biti formirana samo iznad 700 °C, pomoću unutrašnjeg varničenja.

Formiranje metana počinje na oko 275 °C. Povećanjem temperature, proizvodnja etana premašuje metan. Na temperaturi oko 450 °C formiranje vodonika nadmašuje sve druge gasove do oko 750-800 °C, kada se samo acetilen

TABELA 1 GREŠKE KOJE KLASIFIKUJE METODA DUVAL-OVOG TROUGLA 2 [14]

Oznaka	Dijagnostika	Predložene akcije
N	Normalne operacije	
T3	Termička greška ( $T > 700^{\circ}\text{C}$ ), teško nagaranje	Promjena ulja; Inspekcija regulacione sklopke na nagaranje kontakata
T2	Termička greška ( $300 < T < 700^{\circ}\text{C}$ ), nagaranje	
X3	Kvarovi T3 ili T2 u porastu sa lakim nagaranjem ili porast otpora kontakata	Inspekcija regulacione sklopke na znakove lakog nagaranja ili porasta otpora kontakata
D1	Појава претјераног лука у зони D1	Inspekcija regulacione sklopke na znakove male pojave luka
X1	Pojava pretjeranog luka u zoni D1 ili termički kvarovi u porastu	Područje pod istragom

#### IV. PRIMJENA FAZI LOGIKE U ANALIZI GASOVA

##### A. Fazi skup i funkcija pripadnosti

Fazi skup je jedan širi pojam nego klasični skup. Lotfi Zadeh je u svojoj teoriji fazi skupova uveo korišćenje funkcije pripadnosti (*membership function*). Funkcija pripadnosti uzima vrijednosti iz intervala  $[0,1]$  za sve elemente iz klasičnog skupa nad kojim je definisan fazi skup, označavajući na taj način stepen pripadnosti svakog pojedinačnog elementa fazi skupu. Jedna od najvećih razlika između klasičnih i fazi skupova jeste u tome što klasični skupovi uvijek imaju jedinstvenu funkciju pripadnosti, dok se za fazi skup može definisati beskonačno mnogo različitih funkcija pripadnosti kojima se on može opisati. Pomenuti naučnik je definisao i osnove fazi logike (engl. *fuzzy logic*) za logičko opisivanje nejasnoće, koja može da se smatra uopštavanjem binarne Bulove logike (engl. Boolean logic). Za razliku od Bulove logike, kod koje se koriste isključivo dvije vrijednosti („0“ – netačno i „1“ – tačno), fazi logika raspolaže svim vrijednostima iz intervala  $[0,1]$  (gdje „0“ označava potpuno netačno, a „1“ potpuno tačno), kojima se oslikava stepen pripadnosti nekog elementa nekom skupu, odnosno stepen istinitosti neke tvrdnje. Ovo je glavna razlika između klasične i fazi teorije skupova, odnosno binarne i fazi logike: uklanja se jednoznačna, crno-bijela slika i uvode „nijanse“ sive boje, uzimajući u obzir da neka tvrdnja istovremeno može da bude i djelimično tačna i djelimično netačna [1]. Svrha primjene ekspertskih sistema i fazi logike jeste pravovremeno i pravilno donošenje odluka vezanih za održavanje regulacione sklopke energetskog transformatora. Donijeti odluku da se otvori transformator i poduzme neka servina akcija samo na osnovu iskustva ljudi koji se bave dijagnostikom nikada nije bio lak zadatak. Ekspertski sistemi u velikoj mjeri olakšavaju i ubrzavaju donošenje jedne takve odluke, jer imaju mogućnost pravljenja baza podataka dobrih i loših stanja regulacione sklopke.

##### B. Predloženi fazi sistem za analizu stanja regulacione sklopke

U [1] opisan je prijedlog ekspertskog sistema za ocjenu regulacione sklopke koji se sastoji od više ulaza, dobijenih

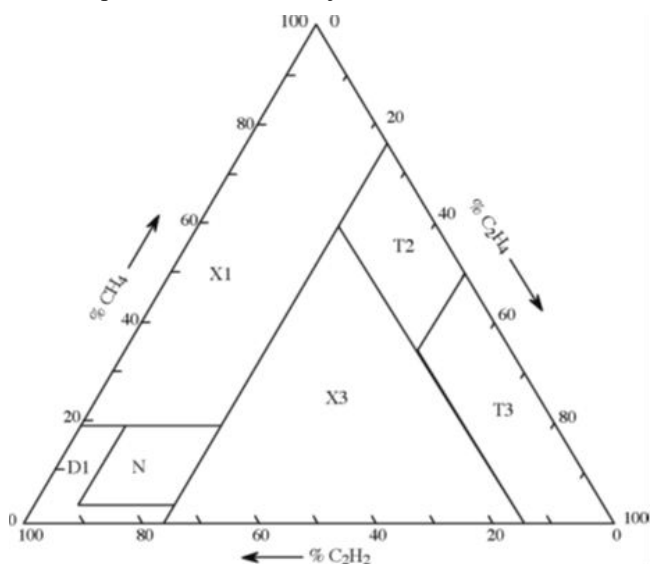
formira. Važno je spomenuti da se i male količine  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$  i  $\text{CO}$  formiraju normalnim starenjem. Termičko razlaganje impregnirane celuloze u ulju formira  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2$ , i  $\text{O}_2$ . Na samo  $100^{\circ}\text{C}$  počinje da se razlaže celulozna izolacija. Dakle, normalan rad transformatora treba da se održava na temperaturama nižim od  $90^{\circ}\text{C}$ .

##### B. Dijagnostičke metode za analizu gasova rastvorenih u ulju

Analiza gasova rastvorenih u ulju (DGA) je najraširenija metoda analize gasova i uspješno se koristi već mnogo godina. Milioni DGA analiza se izvedu svake godine u više od 400 laboratorija širom svijeta. Metoda je primjenjiva za sve tipove uljnih transformatora. Nakon uzimanja uzorka ulja, gasovi se izdvajaju (ekstrakcija), odvajaju, pojedinačno identifikuju i kvantifikuju. Za taj postupak postoji laboratorijska oprema i odgovarajući postupak, a postoje i uređaji koji se ugrađuju na transformator i automatski provode cijeli postupak DGA analize. Glavna prednost ove metode je što u ranoj fazi detektuje gasove, dajući najraniju moguću analizu razvoja kvara.

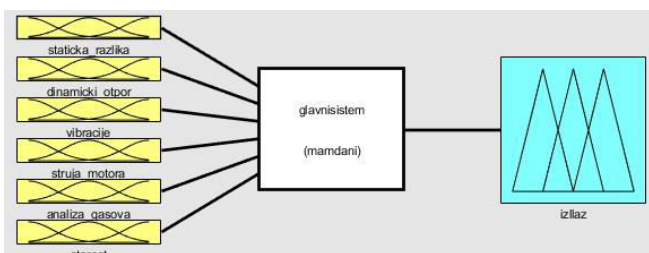
Postoji nekoliko metoda za tumačenje DGA rezultata dobijenih proračunom određenih odnosa zapaljivih gasova rastvorenih u ulju. Najčešće metode tumačenja DGA predložene u [12] (IEC odnos i trougao Duval 1 (DTr-1)) i u [13] (Metod ključnog gasa, - Doernenburg-ova metoda i Rogers-ova metoda tri i četiri odnosa):

Metoda Duvalovog trougla 1 se pokazala prilično efikasnom u određivanju vrste kvara koji se javlja kod uljnih transformatora koji su u upotrebi. Nova verzija Duvalovog trougla, namijenjenog za opremu ispunjenu uljem „Duvalov trougao 2“ [14] za regulacione sklopke ispunjene uljem predstavljen je na Sl. 1. U tabeli 1 je navedena klasifikacija kvarova prema ovom tumačenju.



Slika 1. Duvalov trougao 2 za regulacione sklopke ispunjene uljem [14]

na osnovu različitih tehnika procjene stanja transformatora, odnosno dijagnostičkih metoda za procjenu stanja same regulacione sklopke. Glavni ekspertski fazi sistem predstavljen u [1] je prikazan na Sl. 2. Zasnovan je na Mamdani procesu zaključivanja, na osnovu aplikacije programskog paketa *Matworks Matlab*.



Slika 2. Glavni ekspertski sistem zasnovan na mamdani procesu zaključivanja [1]

Glavni sistem se sastoji od šest ulaza, od kojih su pet dijagnostičke metode za procjenu stanja regulacione sklopke, i broj operacija ili starost regulacione sklopke, koji ima veliki značaj u donošenju konačne odluke glavnog mamdani zaključivanja i izlaza iz sistema.

U okviru glavnog sistema postoje ulazi za: statičku otpornost, dinamičku otpornost, vibracije, struju napajanja pogonskog motora, analizu gasova rastvorenih u ulju regulacione sklopke, ukupan broj operacija sklopke ili njena starost.

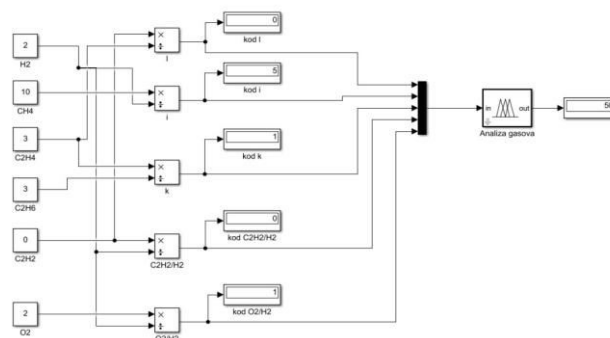
Za svaki od pojedinih šest ulaza napravljen je poseban fazi logički komparator, koji na osnovu više dobijenih svojih ulaznih parametara i posebne tehnike procjene kao izlaz daje stanje regulacione sklopke na osnovu te date dijagnostičke tehnike, a zatim se taj ulaz zajedno sa ostalih pet koristi za formiranje generalne ocjene stanja. Fazi logički komparatori su formirani na osnovu većeg broja dijagnostičkih podataka, dobijenih analizom gasova rastvorenih u ulju realnih transformatora [1].

### C. Predloženi fazi podsistem za analizu gasova rastvorenih u ulju

Prije opisa podsistema Analiza gasova rastvorenih u ulju u [1] je naglašeno da su koncentracije gasova za neke od izvedbi regulacionih transformatora često drugačije i zbog uticaja izolacije koja sadrži veću količinu papira, kakav je slučaj sa modernijim izvedbama regulacionih sklopki [15]. U takvim uslovima se može povećavati koncentracija gasova CO, CO<sub>2</sub>, u uslovima sa oksidacijom ulja usljed termičkog naprežanja pa se i odnos ovih gasova može znatnije mijenjati. S obzirom da kod energetskih transformatora može postojati komunikacija između odjeljka sa regulacionom sklopkom i samog kazana transformatora, u tom slučaju se u transformatorskom dijelu mogu pojavljivati gasovi specifični za funkcionisanje regulacione sklopke. Kada je riječ o novijim konstrukcijama regulacionih sklopki, kod njih uglavnom ne postoji miješanje gasova. Specifična pojava u slučaju rada sklopke je pojava gasova niske energije. U takvim uslovima se odnos gasova C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> veći od 2 ili 3 u glavnom kazanu smatra kao pojava zaprljanja usljed rada sklopke. U istraživanjima [16], tipične vrijednosti gasa C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>

u glavnom kazanu, u uslovima kada postoji komunikacija sa odjeljkom regulacione sklopke se znatno povećava i iznosi 60 μl/l - 80 μl/l, naspram koncentracije od 2 μl/l - 20 μl/l za transformatore kod kojih ne postoji ova komunikacija ili nemaju sklopku. Trend promjene gasa C<sub>2</sub>H<sub>2</sub> se pri tome na godišnjem nivou povećava za 21 μl/l do 37 μl/l, naspram povećanja od 0 μl/l do 4 μl/l za transformatorske kazane bez regulacione sklopke. Pored odnosa C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, za procjenu stanja regulacione sklopke je značajno praćenje i odnosa O<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, čijim promjenama se mogu uočiti neuobičajena zagrijavanja ili oksidacija u transformatorskom ulju. U tom pogledu se posmatraju odnosi koji su manji od 0,3 [17].

Izgled modela za analizu gasova na osnovu fazi logičkih pravila, formiran u Matlab Simulink okruženju, je prikazan na Sl. 3. Model je formiran uz uvažavanje gasova koji se uobičajeno mogu uočiti u transformatorskom ulju, tokom redovne kontrole. Ključni gasovi koji se u ovom slučaju razmatraju u smislu procjene stanja regulacione sklopke se u datom modelu posmatraju na način kao da imaju mogućnost prelaska, tj. komunikacije sa glavnim sudom transformatora. Na taj način se sveukupnom analizom gasova nastoji procijeniti i pojava stanja sa greškom u sudu regulacione sklopke.



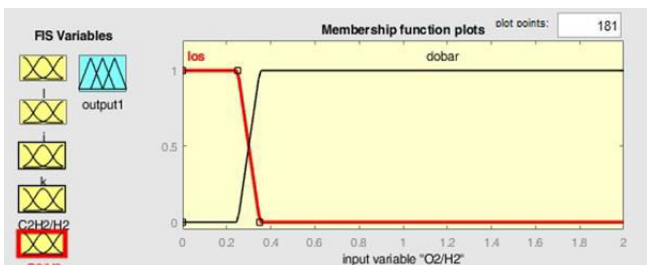
Slika 3. Simulink model analize gasova rastvorenih u ulju [1]

Korišćene funkcije pripadnosti su formirane uz uvažavanje standardnih odnosa gasova koji se mogu pojaviti u ulju, a spominju se u relevantnim standardima. Formirani su ulazi u fazi logički komparator na osnovu više odnosa gasova. Funkcije pripadnosti za odnos gasova C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> označen sa oznakom „i“, odnos gasova CH<sub>4</sub>/H<sub>2</sub> označen oznakom „j“ i odnos gasova C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>6</sub> označen oznakom „k“ su izabrane tako da mogu imati nisku, srednju ili visoku vrijednost u opsegu od 0 do 4. Dok su funkcije pripadnosti za preostala dva ulaza za odnos gasova C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> i odnos gasova O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> izabrane tako da mogu imati vrijednost dobar i loš u opsegu od 0 do 10, odnosno 0 do 2 respektivno.

U radu [18] je predstavljen model za analizu gasova na osnovu fazi logičkih pravila u Matlab Simulink okruženju, ali samo na osnovu tri odnosa gasova „i“, „j“ i „k“. Analiza na konkretnom primjeru je pokazala da se radi o parcijalnom pražnjenju. Međutim, ulazi za odnos gasova C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> i odnos gasova O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>, koji su karakteristični za ulje regulacione sklopke u [18] nisu razmatrani. Primjer izgleda funkcije pripadnosti u MATLAB-u za odnos gasova O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> je prikazan na Sl. 4.

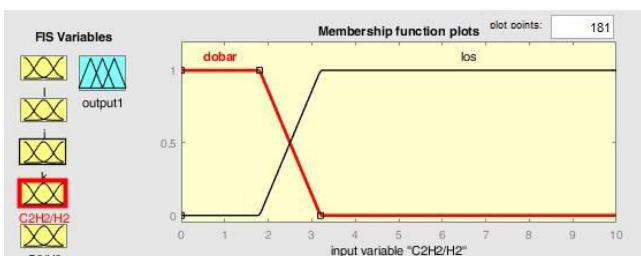
TABELA II FAZI LOGIČKA PRAVILA ODLUČIVANJA ZA ANALIZU GASOVA U TRANSFORMATORSKOM ULJU

l	i	k	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	Izlaz sistema
nisko	nisko	nisko	-	-	normalno
srednje	nisko	visoko			D2
srednje	nisko	srednje	-	-	D1
nisko	visoko	visoko	-	-	T3
nisko	srednje	nisko	-	-	T2
nisko	visoko	nisko	-	-	T2
nisko	nisko	srednje	-	-	T1
nisko	nisko	nisko	dobar	dobar	normalno
nisko	nisko	nisko	loš	dobar	D1
nisko	nisko	nisko	dobar	loš	T1
nisko	visoko	nisko	dobar	dobar	T2
nisko	visoko	nisko	dobar	loš	T2
nisko	visoko	nisko	loš	dobar	T2
nisko	visoko	nisko	loš	loš	T2
nisko	srednje	nisko	dobar	loš	T2
nisko	srednje	nisko	loš	dobar	T2
nisko	srednje	nisko	loš	loš	T2
nisko	visoko	visoko	dobar	dobar	T3
nisko	visoko	visoko	dobar	loš	T3
nisko	visoko	visoko	loš	dobar	T3
nisko	visoko	visoko	loš	loš	T3
srednje	nisko	srednje	loš	dobar	D1
srednje	nisko	srednje	dobar	loš	T1
srednje	nisko	srednje	loš	loš	T1
srednje	nisko	visoko	dobar	dobar	D2
srednje	nisko	visoko	dobar	loš	T1
srednje	nisko	visoko	loš	loš	T1



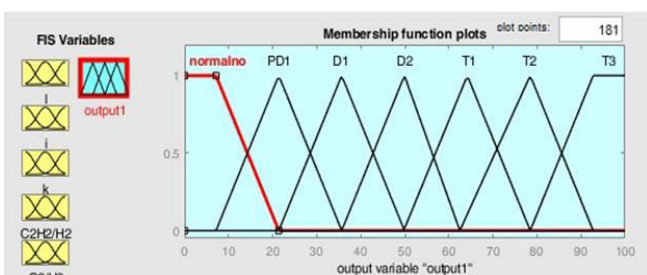
Slika 4. Funkcije pripadnosti za odnos gasova O<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> [1]

Primjer izgleda funkcije pripadnosti u MATLAB-u za odnos gasova C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> je prikazan na Sl. 5.



Slika 5. Funkcije pripadnosti za odnos gasova C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/H<sub>2</sub> [1]

Formiranjem fazi logičkih pravila u podsistemu za ocjenu stanja regulacione sklopke na osnovu analize gasova rastvorenih u ulju dobijaju se ocjene sklopke u smislu parcijalnih pražnjenja (PD), pražnjenja niske ili visoke energije (D1, D2), pojave termičke greške, koja može biti odgovarajuće vrijednosti temperature, ispod 300 °C, između 300 °C i 700 °C ili preko 700 °C (T1, T2, T3 respektivno). Ocjene podsistema se dovode u vezu sa izlazima drugih podsistema u predloženom modelu i na taj način učestvuju u formiranju konačne ocjene o stanju regulacione sklopke energetskog transformatora. Izlazi podsistema, u obliku trougaonih funkcija pripadnosti za ocjenu analize gasova rastvorenih u ulju su prikazani na Sl. 6. Fazi logička pravila formirana u sistemu za odlučivanje o stanju transformatora su navedena u tabeli 2.



Slika 6. Funkcije pripadnosti izlaza podsistema za ocjenu rastvorenih gasova [1]

## V. REZULTATI

Na osnovu formiranih fazi logičkih pravila u ovom poglavlju su prikazani pojedini primjeri koncentracija gasova rastvorenih u transformatorskom ulju, koji predstavljaju ulaze fazi logičkog kontrolera sa Sl. 6. Vrijednosti su proizvoljno generisane u računarskoj simulaciji. Primjeri su prikazani u tabeli 3.

TABELA III PRIMJERI ZAKLJUČIVANJA FAZI LOGIČKOG KONTROLERA

H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	Izlaz sistema
9	10	3	3	0	2	77,82
60	9	3	5	0	16000	60,01
67	4	3	100	0	16000	35,55
40	4	30	100	0	2	50,12
40	150	30	100	0	2	77,91
120	1	79	230	1	120	13,09

Dobijeni izlazi predloženog sistema prikazuju različite vrijednosti izlaza, zavisno od odnosa ulaznih varijabli. Dobijeni zaključci ukazuju na različita stanja u transformatorskom kotlu, od normalnog pogonskog stanja energetskog transformatora, do pražnjenja energije nižeg ili višeg nivoa, kao i pojave termičke greške u transformatoru.

Dobijeni podsistem se u praksi može koristiti u integralnom smislu, zajedno sa ostalim mjerenjima izvedenim tokom redovnog ili vanrednog testiranja rada transformatora, kako bi se došlo do pouzdanijeg zaključka o trenutnom stanju transformatora. Predstavljeni podsistem bi omogućavao ne samo olakšanu procjenu stanja opreme, nego

i pravovremeno donošenje zaključka o pravilnim koracima u održavanju elektroenergetskog sistema.

## VI. ZAKLJUČAK

Ni jedna od dijagnostičkih metoda za analizu stanja regulacione sklopke nije sveobuhvatna, tj. uvijek se ocjena stanja transformatora i regulacione sklopke temelji na rezultatima više metoda. Svaka dijagnostička metoda pokazuje stanje pojedinog dijela transformatora dok ukupna mjerenja te interpretacija izmjerenih podataka daju pravu sliku stanja cijelog transformatora.

DGA je u principu osjetljiva na nepravilan rad kontakata zbog toga što takvi neispravni kontakti stvaraju nagaranja i pregrijavanja ulja. Međutim, uzimanje uzorka ulja iz glavnog suda, često ima prednost u tome što se, ukoliko je u pitanju tip sklopke sa omogućenom cirkulacijom između suda regulacione sklopke i glavnog suda transformatora, pruža informacija o svim komponentama glavnog transformatorskog suda, koje maskiraju tražene informacije o kontaktnim uslovima. Ostale dijagnostičke metode se mogu koristiti za lokalizaciju kvarova koji su indicirani koncentracijama gasova. DGA analiza ne može otkriti mehanička oštećenja, osim ukoliko se radi o termičkim posljedicama oštećenja ili ukoliko mehanički kvarovi za sobom povlače i neusklađenosti u radu kontaktnog sistema ili promjene u funkciji u električnom smislu.

Pored toga, DGA takođe, može da otkrije varničenje i nagaranje kontakata, kao i dielektrične degradacije ali određivanje lokacije na kojoj je došlo do nagaranja ova metoda ne može otkriti.

Primjena ekspertskih znanja i fazi logike u oblasti dijagnostike donosi velike prednosti, jer ima mogućnost prikupljanja i arhiviranja svih rezultata i na taj način ubrzava proces donošenja odluke vezane za hitnost moguće intervencije na osnovu pokazatelja DGA analize. Predloženi fazi sistem može imati veliki značaj za sve one koje se bave dijagnostikom stanja regulacione sklopke. Formirani fazi ekspertski sistem, zajedno sa fazi sistemima drugih dijagnostičkih metoda se mogu primjeniti i u proračunu pouzdanosti, procjene životnog vijeka i određivanja trenutka kada se regulaciona sklopka treba zamjeniti novom.

## LITERATURA

- [1] N. Cincar, "Tehno-ekonomska analiza dijagnostičkih metoda regulacione sklopke energetskog transformatora" doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, 2022. godina
- [2] N. Cincar, "Dijagnostika stanja regulacione sklopke energetskog transformatora metodom mjerenja struje komutacije", magistarski rad, Elektrotehnički fakultet, Istočno Sarajevo, septembar 2011.
- [3] Selection guide, On-load-tap-changer, ABB Power Technology Products AB, IZSE 5492-103 en, Rev. 4, 2002-04-15.
- [4] S. Jokić, "Procjena stanja regulacione sklopke energetskog transformatora metodom mjerenja dinamičke otpornosti" doktorska disertacija, Elektrotehnički fakultet, Univerzitet u Istočnom Sarajevu, 2022. godina
- [5] A. Bojković, Đ. Jovanović, "Preventivna kontrola i održavanje regulacionih sklopki energetskih transformatora", Elektroprivreda, br. 3, 2001.

- [6] R. Levi, B. Milović, „OLTC Dynamic Testing“, TechCon2011.
- [7] D. Dohnal, „On-Load Tap-Changer for Power Transformers“, „Maschinenfabrik Reinhausen GmbH, knowledge base, 2013.
- [8] S. Jokić, N. Cincar, A. Simović, Z. Stojković, "Dijagnostika stanja regulacione sklopke energetskog transformatora metodom mjerenja struje komutacije", Infoteh-Jahorina Vol.11, Ref. ENS-1-3, p. 75-80, March 2012.
- [9] European Standard, „Oil-filled electrical equipment/Sampling of gases and analysis of free and dissolved gases-Guidance“, IEC 60567:2011
- [10] European Standard, "Mineral oil-filled electrical equipment-Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment", IEC 61181:2007.
- [11] N. Cincar, Z. Stojković, A. Simović, S. Jokić, "Primjena Gasne hromatografije u analizi ulja energetskog transformatora sa regulacionom sklopkom", Infoteh-Jahorina Vol.10, Ref. D-8, p. 312-316, March 2011.
- [12] European Standard, „Mineral oil-filled electrical equipment in service-Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analyses“, IEC 60599 2015.
- [13] IEEE. IEEE C57.104-2019—Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers; Institute of Electrical and Electronics Engineers: Piscataway, NJ, USA, 2019.
- [14] M. Duval, The Duval Triangle for Load Tap Changers, Non-Mineral Oils and Low Temperature Faults in Transformers, IEEE, Electrical Insulation Magazine, November/December 2008 – Vol. 24, No. 6
- [15] BAS EN 60599:2016, Электро опрема у погону пуњена минералним уљем – Упутство за тумачење анализа слободних и растворених гасова, доступан на: <a href="https://webstore.iec.ch/publication/23317">IEC
- [16] S. Bustamante, M. Manana, A. Arroyo, A. Laso, R. Martinez, „Determination of Transformer Oil Contamination from the OLTC Gases in the Power Transformers of a Distribution System Operator“, Appl. Sci.2020, 10, 8897; doi:10.3390/app10248897
- [17] M. Duval, A. dePablo, "Interpretation of Gas-In-Oil Analysis Using New IEC Publication and IEC TC 10 Databases", DEIS Feature Article, March/April 2001 – Vol. 17, No.2.
- [18] N. Cincar, S. Jokić, A. Simović, "Primjena fazi logike u dijagnostičkom pristupu analizi ulja energetskog transformatora sa regulacionom sklopkom" Cigre Srbija, R A2 05, jun 2019.

## ABSTRACT

In the operation of power transformers there is a significant number of tap changers and their preventive control and maintenance deserve attention. One of the methods for diagnosing the state of the power transformer's tap changer is the Dissolved Gas in oil Analysis (DGA) method, which can detect errors such as partial discharges, arcing, and increased contact resistance. The application of artificial intelligence and phase logic in the interpretation of the results is of great importance, because it speeds up the decision-making process with the possibility of saving the results and creating a database of all good and bad conditions. The paper presents the DGA method, an example of a concrete application of fuzzy logic within the Matlab software package, as well as a proposal for further action based on this method.

## POSSIBILITIES OF ASSESSING THE CONDITION OF THE POWER TRANSFORMER TAP CHANGER BY APPLYING FUZZY LOGIC IN THE GASES DISSOLVED IN OIL ANALYSIS

Nada Cincar, Srđan Jokić, Zlatan Stojković