



A2 09

**UPOREDNA ANALIZA PARAMETRA I ELEKTRIČNIH MERENJA TOKOM
PROCESA SUŠENJA ENERGETSKIH TRANSFORMATORA U SOPSTVENOM
SUDU "HOT-OIL SPRAY" METODOM**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF PARAMETERS AND ELECTRICAL
MEASUREMENTS DURING THE DRYING PROCESS OF ENERGY
TRANSFORMERS IN THEIR OWN TANK USING THE "HOT-OIL SPRAY"
METHOD**

ALEKSANDAR SPASOJEVIĆ – COMEL TRANSFORMATORI

NIKOLA RADAŠINOVIĆ – COMEL TRANSFORMATORI

BRANKO PEJOVIĆ – INSTITUT NIKOLA TESLA

ĐORĐE JOVANOVIĆ – INSTITUT NIKOLA TESLA

BEOGRAD

SRBIJA

Kratak sadržaj -

Sušenje predstavlja jedan od ključnih procesa u proizvodnji i remontu energetskih transformatora. Metoda sušenja u sopstvenom sudu „Hot-oil spray“ metodom sa sobom nosi dodatne izazove. Izolacija transformatora je jedan od vitalnih delova za rad i životni vek transformatora. Uzimajući ovo u obzir javlja se potreba za što tačnijom procenom osušenosti izolacije unutar transformatora.

Ovaj rad sadrži pregled i analizu rezultata izmerenih tokom sušenja blok transformatora 425 kV / 15,75 kV, 250 MVA. U prvom delu rada je prikazan kvar transformatora zbog koje se javila potreba za popravkom, a samim tim i sušenjem transformatora "HOT-OIL SPRAY" metodom. U drugom delu rada biće opisani izazovi i rešenja koja su korišćena radi sušenja izolacije predmetnog transformatora. Ovde će biti prikazani i parametri praćenja samog procesa sušenja - temperatura, vakuum, vlaga. U trećem delu rada biće prikazani rezultati sprovedenih električnih merenja tokom procesa sušenja - otpor izolovanosti namotaja, ugao

gubitaka, kao i rezultati indirektnih procena osušenosti suve izolacije metodom FDS. Ovde će biti prikazana i uporedna analiza praćenja svih gorenavedenih rezultata.

U četvrtom delu rada biće prikazana finalna merenja parametara transformatora nakon procesa sušenja i punjenja uljem.

Ključne reči – sušenje energetskih transformatora, Hot – oil spray metoda, analiza rezultata, ocena ovlaženosti čvrste izolacije, FDS

1. UVOD

Sušenje transformatora predstavlja jedan od ključnih procesa u proizvodnji ili remontu transformatora koji značajno utiče na životni vek. Najčešće metode sušenja su: sušenje u vakuumskoj sušari; sušenje recirkulacijom ulja; sušenje metodom “hot-oil spray” kao i sušenje metodom potapanja.

Nakon remonta transformatora neophodno je osušiti izolaciju, jer radovi na aktivnom delu (u ovom slučaju zamena namotaja) zahtevaju vađenje aktivnog dela iz suda, demontažu namotaja, izradu novog namotaja kao i ponovnu montažu. Tokom ovog perioda izolacija je bez ulja i pod uticajem ambijenta, a samim tim vlaga migrira iz atmosfere u izolaciju. Ovaj proces je brži za veće temperature izolacije ili ako izolacija nije impregnirana uljem. Imajući u vidu da je za gorenavedene radove potrebno dosta vremena uprkos impregnisanim namotajima, značajna količina vlage će migrirati u izolaciju.

Usled veličine transformatora, različitih ugrađenih materijala, maksimalne temperature tokom procesa sušenja javlja se izazov definisanja trajanja procesa kao i definisanja uslova za završetak sušenja. Direktno praćenje osušenosti izolacije bi predstavilo najbolje rešenje, međutim trenutno su moguće samo indirektnih metode. U ovom radu je napravljena paralela između konvencionalnih i električnih parametara tokom sušenja. Obradeni su sledeći konvencionalni parametri - temperatura, vakuum, količina izvučene vode, aktivnost vode. Takođe, su analizirana električna merenja izolacionog sistema transformatora – merenje ugla gubitaka, otpora izolovanosti namotaja, kao i FDS metoda.

Izazovi da se proceni trajanje sušenja i uslovi za završetak se javljaju usled nedovoljno podataka o količini i vrsti izolacije od koje direktno zavisi maksimalna početna količina vode u izolaciji, kao i stanje izolacije od koje zavisi minimalna količina vode nakon sušenja. Takođe, jako je važno voditi računa o maksimalnoj temperaturi ulja kako se ne bi smanjio DP broj koji direktno utiče na životni vek transformatora.

Prednosti metode „hot-oil spray“ koje je korišćeno za sušenje predmetnog transformatora su:

- Oduzimanje vlage iz izolacionog materijala je kontinualno
- U atmosferi bez kiseonika, postižu se kratki rokovi sušenja
- Količina ulja za grejanje je mala i ispušava se iz transformatora pre finog vakuuma sušenja
- Ispira se namotaj od čestica.
- Usled postignutih visokih temperatura, postiže se visok kvalitet sušenja

2. ISPITIVANJE I DEFEKTAŽA TRANSFORMATORA

U radu su poređeni konvencionalni i električni parametri tokom sušenja transformatora, koja se javila usled potreba za remontom blok transformatora 425 kV / 15,75 kV, 250 MVA, odnosno nakon njegovog otkaza. Na lokaciji transformatora su urađena električna merenja. Analizirajući rezultate sa terena uočeno je uvećanje, struje magnećenja, promena induktivnosti rasipanja, kao i promena u otpornosti namotaja što je sve ukazivalo na kvar na namotaju VN faze 1U. Takođe, urađena je gasno hromatografska analiza uzorka ulja koja je utvrdila visok nivo koncentracije gasova kvara, a to su vodonik, metan i aceten, ocena C. Ova koncentracija gasova ukazuju da je kvar električne prirode, odnosno posledica električnog pražnjenja.

Doneta je odluka da se transformator dopremi u fabriku na defektažu i remont (Slika I.).



Slika I. Vađenje aktivnog dela

Vizuelnim pregledom i demontažom izolacionih aranžmana utvrđeno je sledeće:

1. Oštećenje V.N. namotaja fazi U. U donjem polunamotaju je uočeno oštećenje (topljenje) provodnika kao posledica međuzavojnog kratkog spoja kao i termička degradacija papirne izolacije (Slika II.),
2. Izolacioni aranžmani V.N. namotaja na izvodima faza su nagoreli ili oštećeni,
3. Rasute bakarne čestice po namotaju zbog kratkog spoja



Slika II Kvar na fazi U visokonaponskog namotaja

3. PROCES SUŠENJA PREDMETNOG TRANSFORMATORA

Predmetni transformator je sušen metodom „hot-oil spray“ u fabričkoj hali. Sa ciljem uštede energije transformator je spolja bio zaštićen (slika III.). Sušenje je sprovedeno tako što su postavljene mlaznice na adekvatna mesta na poklopacu suda transformatora tj. na otvorima (Slika IV.).



Slika III. Prikaz transformatora prekrivenog najlonom zbog održavanja temperature



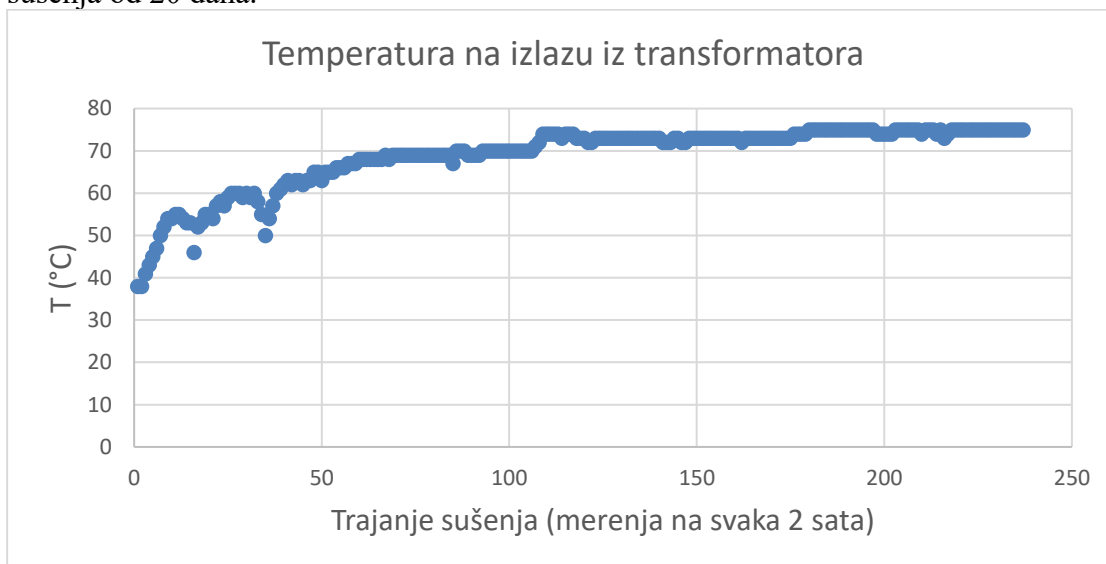
Slika IV. Prskalice na ploči

Transformator je prvo vakuumiran, a nakon toga je aktivni deo „prskan“ toplim uljem preko mlaznica i na ovaj način su grejani namotaji. Ovim procesom je uklanjana vlaga iz izolacionog sistema. Ulje se sakupljalo na dnu transformatora do nivoa donjeg jarma, koje se vraćalo u mašinu na obradu i dogrevanje, a zatim ponovo vraćalo u transformator preko mlaznica.

Ovaj proces se ponavljao sve dok se nisu postigli željeni parametri temperature, vakuuma, količine i aktivnosti vode u ulju, kao i količina izvučene vlage.

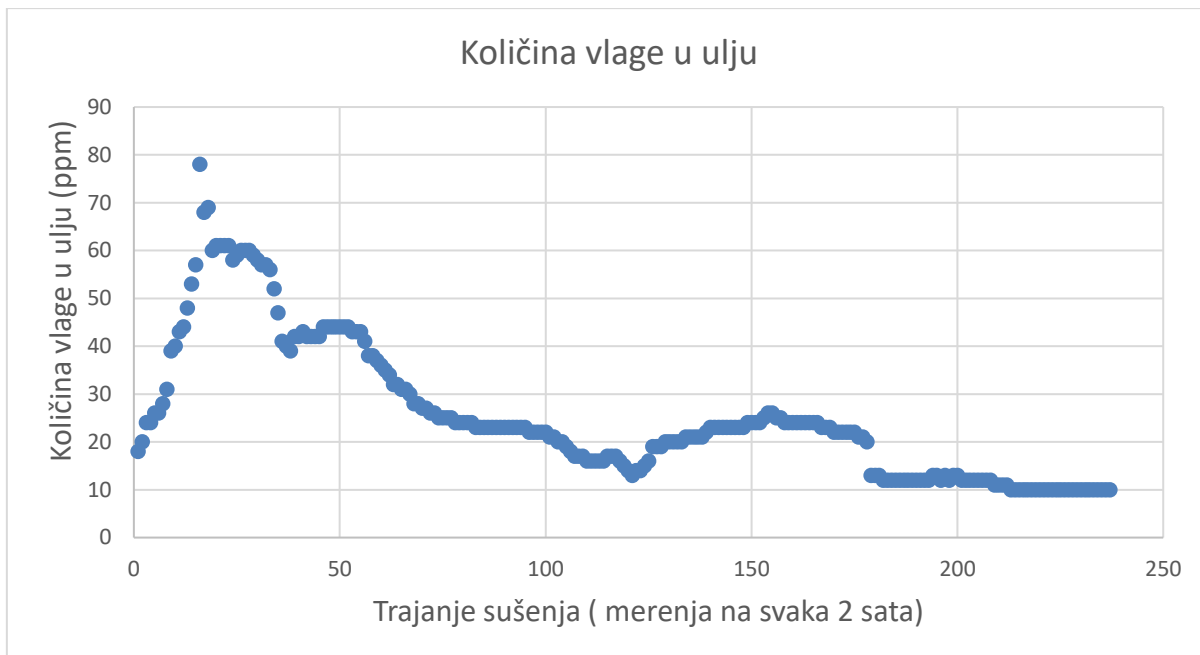
Tokom procesa je praćena temperatura ulja koja se ustalila i održavana je na $\approx 80^{\circ}\text{C}$, a vakuum je ustaljen i održavan od 1 do 1.3 mbar. [1]

Na slici V. je prikazan dijagram temperature ulja na izlasku iz transformatora za period sušenja od 20 dana.

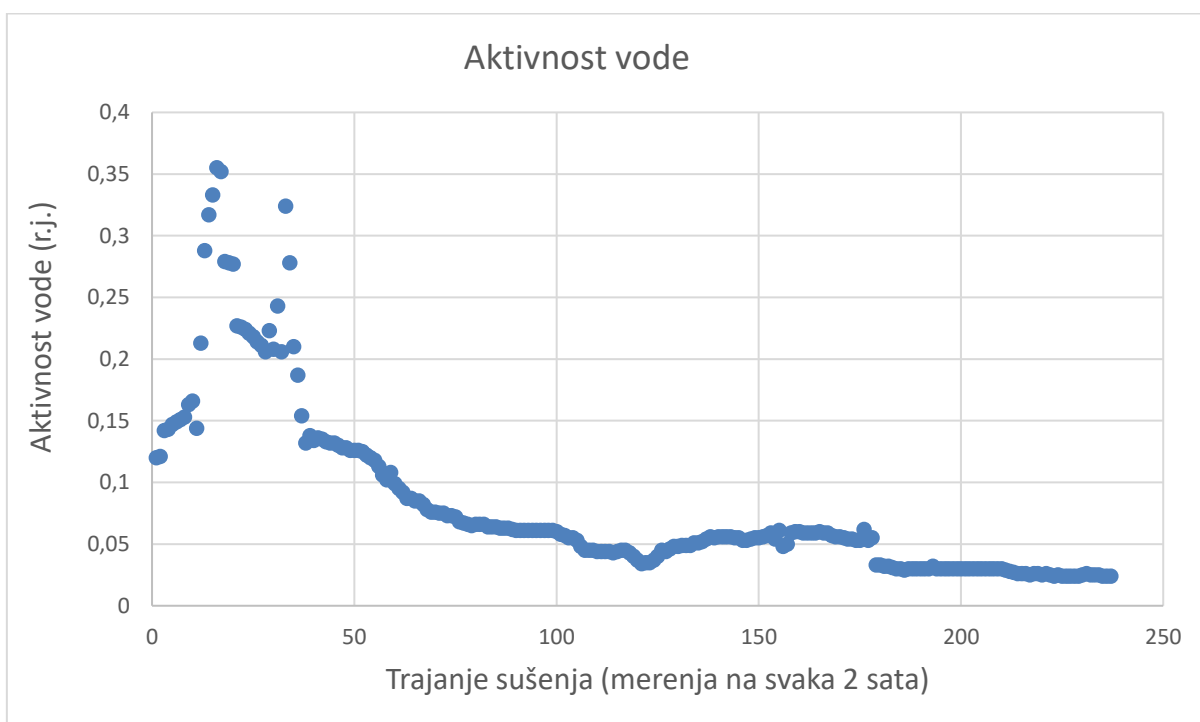


Slika V. Dijagram temperature tokom procesa sušenja

Takođe, tokom procesa je praćena količina izvučene vode, aktivnost i količina vode u ulju. Na slici VI. je prikazan dijagram količine vode u ulju, a na slici VII dijagram aktivnosti vode u ulju.



Slika VI. Dijagram količine vode u ulju

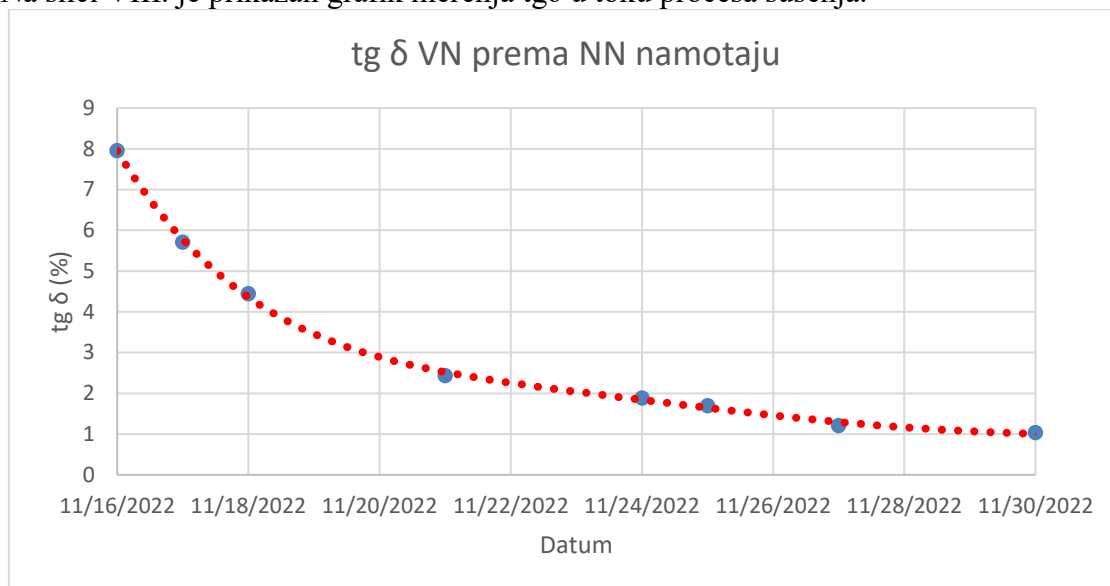


Slika VII. Dijagrami aktivnosti vode u ulju

4. REZULTATI ELEKTRIČNIH MERENJA TOKOM PROCESA SUŠENJA

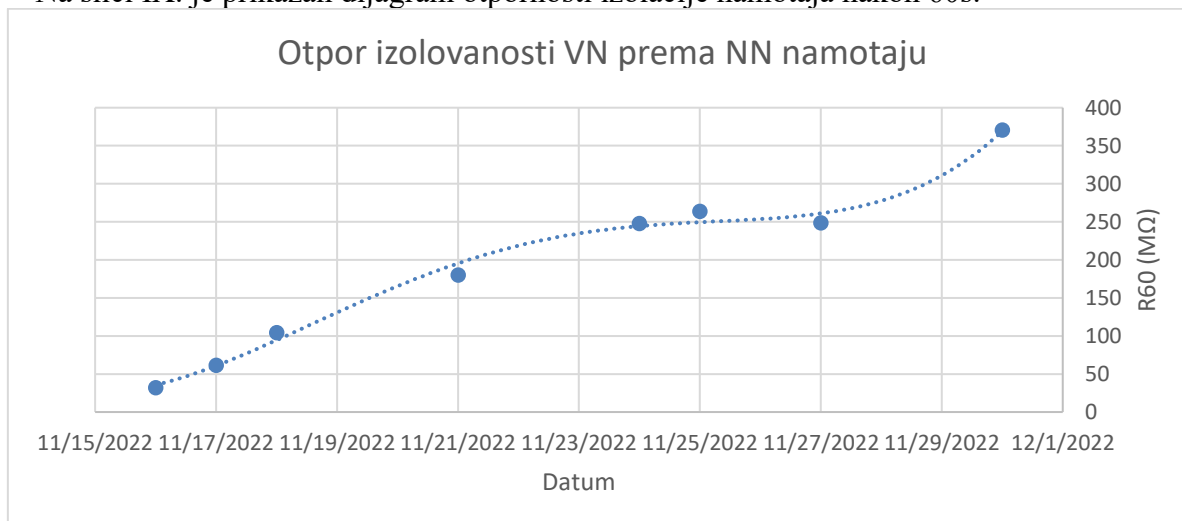
Na transformatoru su pre početka sušenja namontirana dva izolatora za merenje, jedan V.N. namotaja i jedan izolator za N.N. namotaj. Da bi se pratio tok sušenja, odlučeno je da se meri ugao gubitaka ($\text{tg}\delta$) namotaja, otpornost izolacije namotaja nakon 60s (R_{60}) i FDS.

Na slici VIII. je prikazan grafik merenja $\text{tg}\delta$ u toku procesa sušenja.



Slika VIII. Grafički prikaz rezultata merenja $\text{tg}\delta$ (polinom petog reda)

Na slici IX. je prikazan dijagram otpornosti izolacije namotaja nakon 60s.

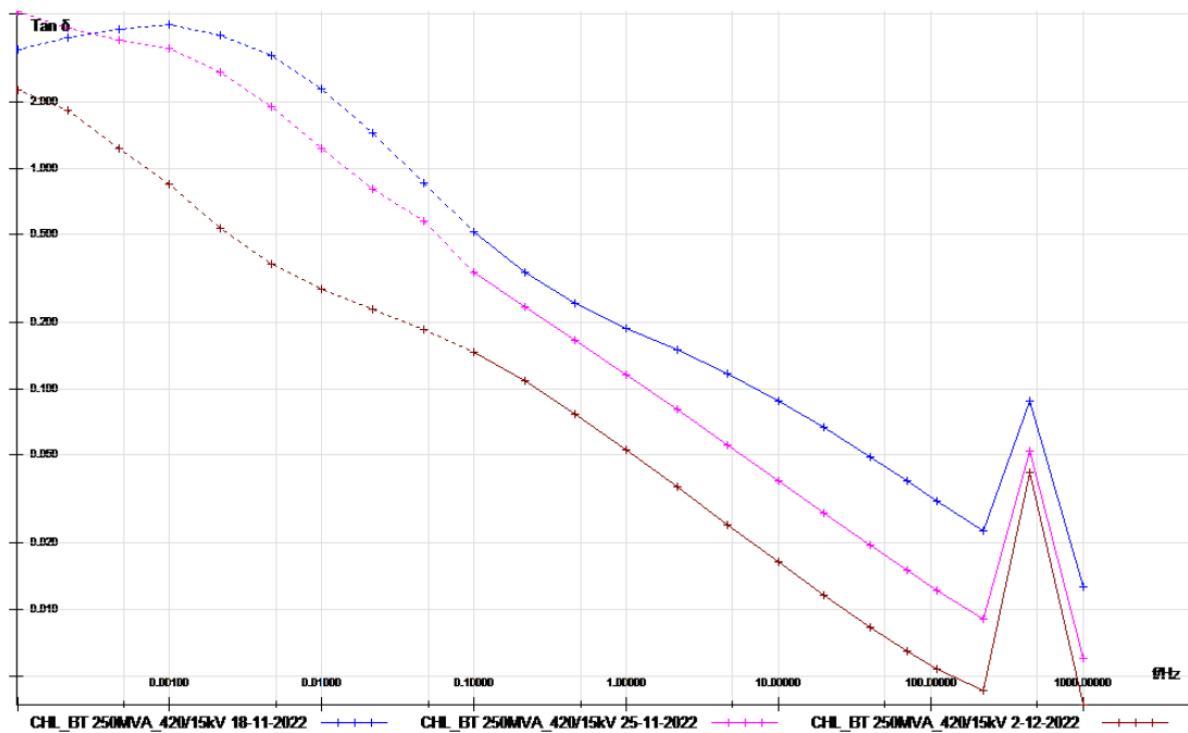


Slika IX. Grafik otpornosti izolacije namotaja pri jednom minutu merenja (polinom četvrtog reda)

Tokom procesa sušenja „Hot-Oil spray“ metodom, koji je predmet ovog rada, promena parametara izolacionog sistema praćena je i povremenim ispitivanjem metodom FDS. Ovo je prvi pokušaj praćenja procesa sušenja transformatora ovom metodom. Obavljena su ukupno

četiri ispitivanja. Tri ispitivanja su obavljena u razmacima od po 7 dana u toku procesa sušenja, a četvrto je urađeno kao završno ispitivanje na kompletno osušenom i opremljenom transformatoru u sklopu fabričkih prijemnih ispitivanja (FAT).

Treba reći da je cela konfiguracija ispitivanog objekta vrlo specifična – ulje u tečnoj fazi se nalazilo praktično samo na dnu transformatorskog suda, aktivni deo transformatora je bio u vreloj uljnoj pari dok je u gornjim slojevima održavan vakuum. Dakle, prilično daleko od modela izolacionog sistema transformatora na koji se bazira metoda *FDS*, a koji uključuje čvrstu izolaciju – barijere i odstoynike i tečnu izolaciju – ulje. Samim tim, modelirane karakteristike sa poznatim parametrima i konfiguracijom izolacionog sistema koje su na raspolaganju za poređenje su ograničene na realno stanje transformatora u eksploataciji i nisu pokrile specifične slučajeve kakav je ovaj. Prema tome, procene sadržaja vlage je bila dosta komplikovana, parametri modelirane krive su se morali ručno da podešavaju kako bi se dobila karakteristika najpribližnija izmerenoj. Zato se procene sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji moraju uzeti sa značajnom dozom rezerve i snimljene frekventne karakteristike treba posmatrati dominantno kvalitativno, uporedo i sagledati u kom pravcu se pomeraju kako se menja sadržaj vlage. Slika X prikazuje rezultate ispitivanja po metodi *FDS* od 18.11., zatim 25.11. i na kraju 2.12.2022. godine



Slika X. Dielektrični frekventni odzivi snimljeni tokom procesa sušenja Hot Oil spray metodom

U tabeli I date su vrednosti izolacionih parametara i karakteristika konfiguracije ispitivanog izolacionog sistema transformatora dobijene analizom frekventnih karakteristika primenom metode *FDS*.

Tabela I: Tabela sa parametrima izolacionog sistema dobijeni na osnovu analize odziva FDS

Redni broj ispitivanja:	(1)	(2)	(3)
Datum ispitivanja:	18.11.2022.	25.11.2022.	2.12.2022.
Procenjen sadržaj vlage:	2.7 %	2.2 %	1.8 %
Relativno zasićenje vlagom:	15.2 %	14.1 %	6.8 %
Ocena ovlaženosti:	umereno vlažno	umereno vlažno	suvo
Kritična temp stvaranja mehurića:	145 °C	153 °C	160 °C
Temperatura ulja:	89 °C	76 °C	70 °C
Provodnost ulja:	16 fS/m	52 fS/m	59 fS/m
Ocena kvaliteta ulja	vrlo dobro	vrlo dobro	vrlo dobro
Kapacitet pri 50Hz:	4.0945 nF	3.9019 nF	3.6231 nF
Tanδ pri 50Hz:	<u>4.454 %</u>	<u>1.761 %</u>	<u>0.752 %</u>

Nagli skok karakteristike pri višim učestanostima je posledica elektromagnetne smetnje i prilikom analize su ignorisani (o tome je konsultovana i tehnička podrška proizvođača mernog uređaja). Iako je ovom prilikom izvršeno svega tri merenja metodom FDS tokom procesa sušenja, što su autori već zaključili da je nedovoljan broj, fenomenološki gledano dobijene frekventne karakteristike zavisnosti. [2]

Dobijene karakteristike su frekventna zavisnost $tg\delta$ i ako se posmatraju apsolutne vrednosti pri 50Hz vidi se da one opadaju od 1. prema 3. ispitivanju, a da se kompletna frekventna karakteristika pomera prema nižim učestanostima što odgovara sniženju sadržaja vlage, odnosno ide u pravcu sušenja. Zaključak autora je da je ovoga puta svakako izvršen nedovoljan broj ispitivanja, svega tri ispitivanja ali da se uprkos tome dobila potvrda o procesu sušenja čvrste izolacije koji ide u dobrom smeru. Uprkos specifičnosti konfiguracije ispitivanog objekta izvršena je analiza i procena sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji koja kreće od vrednosti 2,7% za prvo ispitivanje, tri dana nakon započinjanja procesa sušenja sprejom, zatim opada na 2,2% što je još uvek karakteristika umereno vlažne izolacije da bi nakon 3. ispitivanja sadržaj vlage opao na 1,8% što izolaciju svrstava u suhu, prema *IEC 60422 "Mineral insulating oils in electrical equipment – Supervision and maintenance guidance"*. [3]

Ovim je pokazano da praćenje procesa sušenja metodom FDS svakako ima perspektivu, neophodno je steći dodatno iskustvo prilikom narednih procesa, ispitivanja obavljati na 2-3 dana u toku sušenja i precizno beležiti sve relevantne parametre kako bi se mogla da izvuče i neka kvantitativna veza i zakonitost.

5. FAT ISPITIVANJA 250 MVA BLOK TRANSFORMATORA

Nakon uspešno završenog procesa sušenja, transformator je namontiran i ispitan. U ispitnoj laboratoriji je proveren izolacioni sistem merenjem otpora izolovanosti namotaja, kapaciteta i ugla gubitaka, ispitivanje dovedenim naponom, ispitivanje indukovanim naponom i ispitivanjem udarnim talasom. Na slici XI. prikazan je transformator tokom ispitivanja.



Slika XI. Pogled transformatora odozgo prilikom ispitivanja udarnim naponom

U tabeli II. prikazani su rezultati merenja otpora izolovanosti namotaja. Merenje je vršeno pri temperaturi od 21 °C.

Tabela II. Otpor izolovanosti namotaja

IZMEĐU	U_i [kV]	R15 [Ω]	R60 [Ω]	R60/R15
VN - NN (M)	5	15.1	39	2.583
VN - M (NN)	5	12.4	33.2	2.677
NN - M (VN)	5	4.63	12.05	2.603

Gde su:

- U_i – ispitni napon
- R15 – otpornost izolovanosti pri 15 sekundi
- R60 – otpornost izolovanosti pri 60 sekundi

U tabeli II. prikazani su rezultati merenja kapaciteta i $\text{tg}\delta$ namotaja. Merenje je vršeno pri temperaturi transformatora od 21 °C.

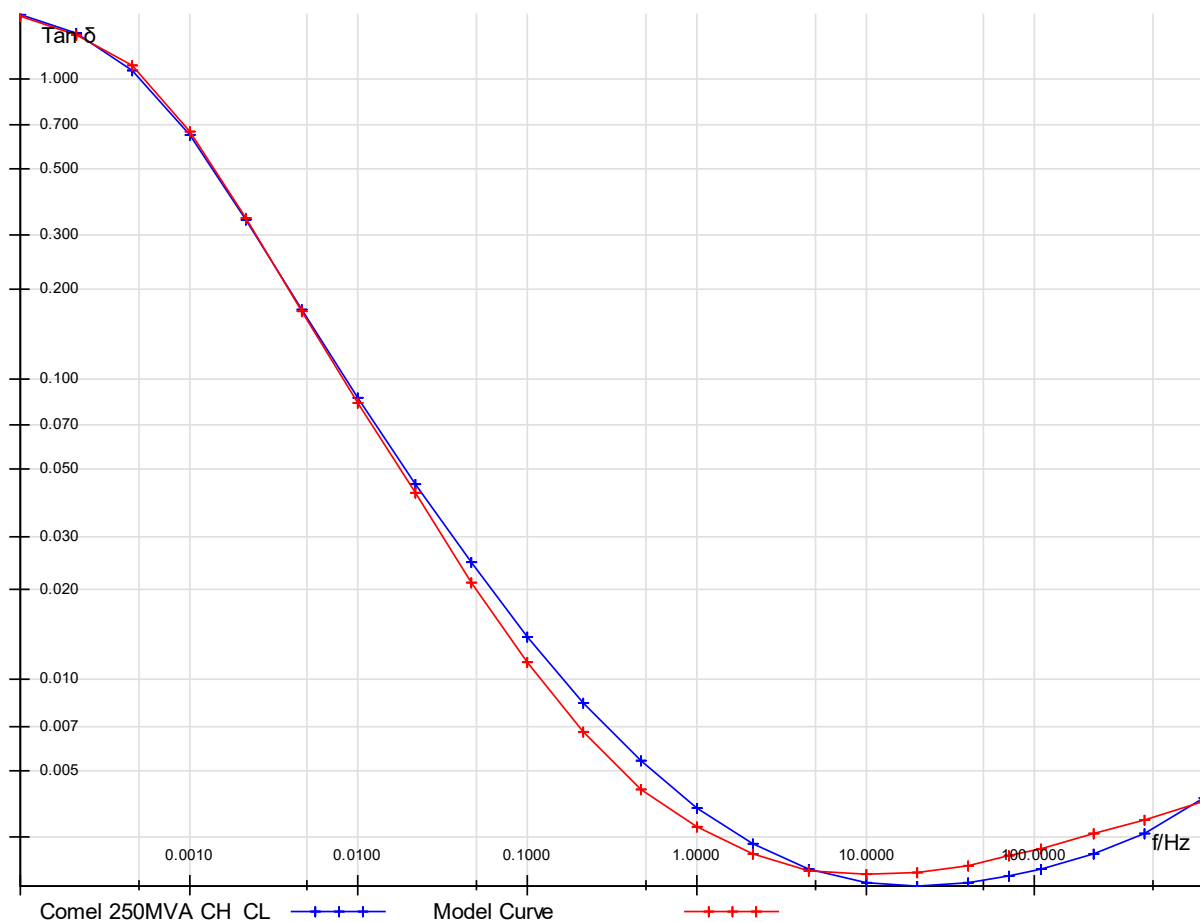
Tabela III. Kapaciteti i $\text{tg}\delta$ namotaja

IZMEĐU	U_i [kV]	$\text{tg}\delta$ [%]	$\text{tg}\delta$ [%] sved. na 20 °C	C_x [pF]
VN - NN (M)	10	0.215	0.205	6337
VN - M (NN)	10	0.336	0.32	6035
NN - M (VN)	10	0.275	0.262	19980

Gde su:

- $\text{tg}\delta$ – faktor disipacije
- C_x – međusobni kapacitet namotaja i namotaja prema masi

Poslednje, 4. ispitivanje metodom FDS usledilo je u toku završnih prijemnih ispitivanja na kompletno opremljenom transformatoru kada je dobijena idealna frekventna karakteristika zavisnosti $\text{tg}\delta$ na osnovu koje je izvršena procena sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji od 1,2%. Plavom bojom označena je karakteristika koja je snimljena pri ispitivanju, dok je crvenom linijom obeležena modelovana kriva. Vidi se skoro potpuno poklapanje u praktično celom frekventnom domenu, a posebno u oblasti nižih učestanosti koja dominantno utiče na tačnost procene sadržaja vlage u čvrstoj izolaciji.



Slika XII. Dielektrični frekventni odzivi snimljeni tokom završnih prijemnih ispitivanja

6. ZAKLJUČAK

Tokom procesa sušenja detaljno su praćeni konvencionalni parametri: temperatura, vakuum, aktivnost i vlaga u ulju. Ustaljenje svih navedenih parametra predstavljalo je ključan faktor za prestanak sušenja. Dodatno sprovedena električna ispitivanja su doprinela proceni završetka procesa sušenja čiji su zadovoljavajući parametri bili dodatni dokaz da je proces sušenja završen. Kao finalna potvrda procesa su ispitivanja na kompletiranom transformatoru.

Pokušaji primene električnih merenja, otpora izolacije i ugla gubitaka kao i metode FDS mogu da se ocene uspešnim iako je ovoga puta izvršen ograničen broj merenja, svakako nedovoljan za preciznije poređenje sa parametrima na kompletiranom transformatoru.

Bilo bi poželjno uvesti u praksu da se mere električne veličine tokom budućih procesa sušenja „hot oil spray“ metodom kako bi se izrodila baza podata, a sve u cilju dobijanja željenih vrednosti na kompletiranom transformatoru.

7. LITERATURA

[1] CIGRÉ Brochure 349 WG A2.30 "Moisture equilibrium and moisture migration within Transformer insulation system", 2008.

[2] D.Jovanovic, B. Pejovic, J.Lazic, J.Ponocko i ostali, "Primena nove metode ispitivanja energetskih transformatora-dielektrična spektroskopija u frekventnom domenu (FDS)", 3. savetovanje CIGRE Cra Gora

[3] IEC 60422 Mineral insulating oils in electrical equipment - Supervision and maintenance guidance 2013-01-10

**COMPARATIVE ANALYSIS OF PARAMETERS AND ELECTRICAL
MEASUREMENTS DURING THE DRYING PROCESS OF ENERGY
TRANSFORMERS IN THEIR OWN TANK USING THE “HOT-OIL SPRAY”
METHOD**

ALEKSANDAR SPASOJEVIĆ – COMEL TRANSFORMATORI

NIKOLA RADAŠINOVIĆ – COMEL TRANSFORMATORI

BRANKO PEJOVIĆ – INSTITUT NIKOLA TESLA

ĐORĐE JOVANOVIĆ – INSTITUT NIKOLA TESLA

BELGRADE

SERBIA

SUMMARY

Drying of transformers represents one of the most important process during production and overhaul of power transformers. Hot oil spray drying method in own tank brings additional challenges. Transformer insulation is one of the most important part for its life time. This brings need of manufacture to accurately estimate dryness of insulation inside transformer.

This paper contains review and analysis of the results measured during drying of step-up transformer 425 kV / 15,75 kV, 250 MVA. In the first part of the paper, the failure of the transformer is shown, which is the reason for overhauling of the transformer and for its drying with Hot-oil spray method. In the second part of the paper shows challenges and solutions used during drying of transformer insulation. It also contains parameters of drying process – temperature, vacuum and moisture. Third part of the paper shows results of electrical measurements conducted during drying process – insulation resistance, dissipation factor and FDS method. It also contains comparative analysis of all stated parameters.

Fourth part of paper shows final transformer parameters after the drying process and oil filling.

KEYWORDS – drying of power transformers, Hot – oil spray method, result analysis, dryness of insulation, FDS