

MERNI TRANSFORMATORI 110 kV – PRAĆENJE STANJA, MERE ODRŽAVANJA I STATISTIČKE RASPODELE REZULTATA GASNOHROMATOGRAFSKE ANALIZE ULJA

D. Obradović¹, EPS - P.D. "Elektrovojvodina" - Sektor eksploatacije Uprave, Srbija

UVOD

Pre oko 20 godina su počeli radovi na utvrđivanju stanja mernih transformatora 110 kV vršenjem merenja parcijalnih pražnjenja na velikom broju mernih transformatora 110 kV i manjeg broja GH analiza ulja na osnovu rezultata merenja parcijalnih pražnjenja. Kasnije se sporadično, na manjem broju mernih transformatora vršila GH analiza. U toku 2005. godine je izvršeno merenje parcijalnih pražnjenja ultrazvučnom metodom na većini mernih transformatora 110 kV koji su imali mogućnost merenja. U cilju utvrđivanja i praćenja stanja, a nakon nabavke uređaja za GH analizu i uređaja za ultrazvučno ispitivanje parcijalnih pražnjenja početo je sistematično praćenje stanja mernih transformatora 110 kV. U poslednjih nekoliko godina je obavljena gasnohromatografska analiza velikog broja uzoraka ulja iz mernih transformatora 110 kV sa uljnopapirnom izolacijom, zaptivenih, sa membranama izrađenim od različitih materijala. Izvršena je detaljna analiza dobijenih rezultata GH analiza i na osnovu količina i odnosa gasova [1], kao i kvarova u prethodnom periodu određeni su kritični merni transformatori i kritični tipovi. Nakon nabavke mernih transformatora 110 kV, u prvoj polovini 2011. godine je izvršena zamena strujnih i naponskih mernih transformatora tipova koji su bili najlošiji po GH analizi i koji su imali najveći broj kvarova. Za nekoliko karakterističnih tipova mernih transformatora 110 kV su prikazane statističke raspodele. Zaključak daje smernice za dalje postupanje u poslovima održavanja mernih transformatora 110 kV.

PRAĆENJE STANJA STRUJNIH I NAPONSKIH MERNIH TRANSFORMATORA 110 kV

Zbog potrebe da se utvrdi stanje mernih transformatora 110 kV i zbog kvarova u prethodnim godinama je počelo sistematično praćenje stanja mernih transformatora 110 kV. Na svim mernim transformatorima 110 kV gde je bilo moguće (konstruktivni razlog) izvršeno je merenje parcijalnih pražnjenja ultrazvučnom metodom. Kod svih mernih transformatora 110 kV kod kojih su ultrazvučnom metodom utvrđena parcijalna pražnjenja izvršena je GH analiza ulja koja je u potpunosti potvrdila nalaze ultrazvučne metode. Nakon nekoliko godina je ponovljeno merenje parcijalnih pražnjenja ultrazvučnom metodom uređajem drugog tipa te je uzet veći broj uzoraka ulja za GH analizu i oni koji su ultrazvučnom metodom pokazali viši nivo parcijalnih pražnjenja su GH analizom ulja pokazali isto. Prema rezultatima GH analize vidi se da su neki pored parcijalnih pražnjenja imali i termičke probleme. Pošto deo mernih transformatora 110 kV nije mogao da bude ispitan ultrazvučnom metodom i zbog toga što parcijalna pražnjenja mogu biti prolazna (pojave se, nestanu i opet se

¹ Dušan Obradović, EPS-P.D. "Elektrovojvodina" - Sektor eksploatacije Uprave, Bulevar oslobođenja 100, 21000 Novi Sad (dusan.obradovic@ev.rs)

pojave) zaključeno je da verovatno ima još mernih transformatora 110 kV sa parcijalnim pražnjenjima. Zbog ovog, zbog kvarova na tipovima koji nemaju parcijalna pražnjenja, a i zbog mogućnosti utvrđivanja stanja mernih transformatora 110 kV doneta je odluka da se gasnohromatografska analiza uradi na mernim transformatorima 110 kV na kojima se zbog konstrukcije nije moglo obaviti merenje parcijalnih pražnjenja i na drugima gde merenje parcijalnih pražnjenja nije pokazalo postojanje parcijalnih pražnjenja, a imali su veći broj kvarova. Kod svih ovih uzoraka su razmotreni i drugi gasovi i utvrđeno je da kod nekih tipova postoje problemi termičke prirode, posebno izraženo kod tipova koji su imali veći broj kvarova.

U Tabeli I su prikazani kvarovi mernih transformatora od početka 2003. godine do marta 2012. godine.

Tabela 1 – Kvarovi na mernim transformatorima 110 kV od 2003. do 2012. godine

Redni broj	Datum kvara	Tip mernog transformatora	Godina proizvodnje	Uzrok	Šteta (dinara)	TS
1	21.07.2003.	APU-123	1975	Proboj	350.000	Sombor 2
2	20.09.2003.	APU-123	1975	Proboj	350.000	Odžaci
3	24.08.2004.	4APU-123	1980	Proboj	350.000	Novi Sad 2
4	06.04.2005.	VPU-110	1964	Proboj	3.500.000	Kikinda 1
5	31.07.2005.	APU-123	1975	Proboj	4.180.000	Pančevo 3
6	26.01.2006.	VPU-123	1986	Proboj	350.000	Kovin
7	05.12.2006.	TPE-11C	1984	Parc. praž.	200.000	Subotica 1
8	11.05.2007.	VPU-123	1969	Proboj	800.000	S.Mitrovica 1
9	16.08.2008.	APU-123	1969	Proboj	2.000.000	S.Mitrovica 1
10	08.12.2008.	VPU-123	1969	Proboj	1.500.000	S.Mitrovica 1
11	03.08.2009.	6VPU-123	1986	Proboj	700.000	B.Palanka 2
12	16.02.2010.	3VPU-123	1978	Proboj	700.000	Šid
13	06.06.2010.	3VPU-123	1978	Proboj	500.000	Ruma-2
14	19.07.2010.	VPU-110	nepoznato	Proboj	2.500.000	Zrenjanin-1

Procena štete je iz vremena kada se havarija dogodila. U poslednje vreme učestaliji kvarovi su kod naponskih mernih transformatora 110 kV.

U cilju praćenja stanja mernih transformatora 110 kV nastaviće se vršenje merenja parcijalnih pražnjenja ultrazvučnom metodom tamo gde je moguće i GH analize ulja kod svih tipova mernih transformatora 110 kV.

MERE ODRŽAVANJA NA STRUJNIM I NAPONSKIM MERNIM TRANSFORMATORIMA 110 kV

Osnovno održavanje mernih transformatora podrazumeva revizije koje se rade jednom godišnje i uključuju kompletan vizuelni pregled mernog transformatora u isključenom stanju i termovizijsko snimanje u uključenom stanju. Remont se radi svake godine ili po potrebi na osnovu nalaza revizije. Nakon revizije se u istom danu izvrši čišćenje i otklanjanje manjih nedostataka koji se mogu otkloniti na licu mesta (popravka korozije, farbanje, pritezanje zavrtneva za učvršćenje, zamena uljokaznog stakla, zamena dilatacione membrane, dolivanje ulja, tariranje dilatacione membrane,...). U slučaju nemogućnosti otklanjanja curenja ulja na licu mesta izvrši se zamena mernog transformatora, a otklanjanje curenja se obavi u radionici. Curenje može biti posebno opasno u smislu da su ovi merni transformatori potpuno zaptiveni sa dilatacionom membranom, tako da u slučaju da dođe do skupljanja ulja prilikom hlađenja vlaga iz vazduha ili voda mogu ući u unutrašnjost i ovlažiti ulje i preko ulja čvrstu papirnu izolaciju.

Preventivno održavanje obuhvata mere na utvrđivanju i praćenju stanja mernih transformatora 110 kV, a iste su navedene u prethodnoj tački.

Ostale primenjene mere održavanja se odnose na analizu svih prikupljenih podataka o mernim transformatorima koji obuhvataju osnovne podatke mernih transformatora razvrstane po proizvođaču, tipu, starosti, rezultate merenja i ispitivanja i podatke o kvarovima i štetama koje su posledica kvarova. U mere održavanja se mora ubrojati i održavanje rezerve mernih transformatora 110 kV i rezervnih delova. U prethodnom periodu je u dva navrata na većem broj mernih transformatora proizvođača „A“ koji su imali parcijalna pražnjenja izvršena reparacija [2] za koju se može reći da je bila uspešna. Analizom stanja mernih transformatora se došlo do zaključka da treba izvršiti zamenu većeg broja mernih transformatora 110 kV tipova koji su istovremeno imali najlošije rezultate GH analize i najveći broj kvarova, a većini je i starost veća od 30 godina. Nakon nabavke strujnih i naponskih transformatora 110 kV u prvoj polovini 2011. godine je izvršena zamena većeg broja strujnih i naponskih mernih transformatora 110 kV proizvođača „B“. Ovom zamenom je veći broj strujnih i

naponskih transformatora 110 kV koji se koriste za merenje preuzete električne energije koji su imali veću klasu tačnosti doveden u klasu traženu po postojećim propisima. Pored ovog prilikom ciljanih GH analiza je pronađeno nekoliko mernih transformatora 110 kV koji su imali parcijalna pražnjenja ili visok sadržaj vode i isti su zamenjeni. Može se pretpostaviti da zahvaljujući ovim radovima u 2011. godini i radovima u prethodnim godinama nije bilo kvarova strujnih i naponskih mernih transformatora 110 kV u 2011. godini i početkom 2012. godine.

Dodatne mere na održavanju, a u cilju boljeg uvida u stanje mernih transformatora 110 kV, su dodatna ispitivanja mernih transformatora 110 kV na terenu sa merenjem otpora izolacije i merenjem tangens delta i kapacitivnosti. Razlog je taj što i stanje izolacionog sistema može biti uzrok kvarova mernih transformatora 110 kV. Iako merenje parcijalnih pražnjenja i GH analiza pokazuju da nema problema, loše stanje izolacionog sistema može biti uzrok da u kratkom roku od nekoliko godina može da dođe do veoma brzog pogoršanja i do kvara mernog transformatora. Sve mere na održavanju se moraju nastaviti u narednom periodu uz dodatna ispitivanja i detaljne preglede kao u [3].

Priprema radova na zamenu obuhvata nabavku priključnih stezaljki, izradu prilagodnih ploča i usklađivanje termina radova sa planiranim radovima. Nakon puštanja u pogon se obave odgovarajuće provere (očitanja), a u cilju provere na većem broju lokacija su obavljena merenja opterećenja sekundara mernih transformatora.

STATISTIČKE RASPODELE REZULTATA GH ANALIZE ULJA KARAKTERISTIČNIH TIPOVA MERNIH TRANSFORMATORA 110 kV

Rezultati GH analiza mernih transformatora 110 kV će biti prikazani u obliku statističkih raspodela. Korišćenje statističkih raspodela u analizi i određivanju dozvoljenih opsega i granica za različite podatke i rezultate merenja i ispitivanja se može iskoristiti za izdvajanje dela posmatrane opreme kojoj se mora detaljnije analizirati stanje u cilju sagledavanja potrebe za vršenjem odgovarajuće radnje (remont, popravka, zamena,...). Pored ovog određivanje dozvoljenih opsega i granica pomoću statističkih raspodela se može iskoristiti za utvrđivanje parametara i težinskih faktora kod određivanja merila za određivanje stanja i potrebe za vršenjem radova na elektroenergetskoj opremi [4].

Raspodele koje se koriste su Normalna ili Gausova (Gauss) raspodela i Vejbulova (Weibull) raspodela. Funkcija raspodele verovatnoće za Normalnu ili Gausovu raspodelu je data jednačinom:

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi \cdot \sigma^2}} \cdot e^{-\frac{(x-\mu)^2}{2 \cdot \sigma^2}}, \quad (1)$$

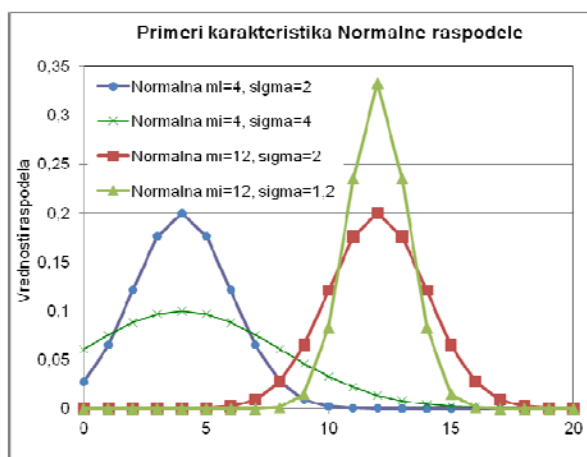
gde su μ srednja vrednost i σ standardno odstupanje.

Funkcija raspodele verovatnoće za Vejbulovu raspodelu je data jednačinom:

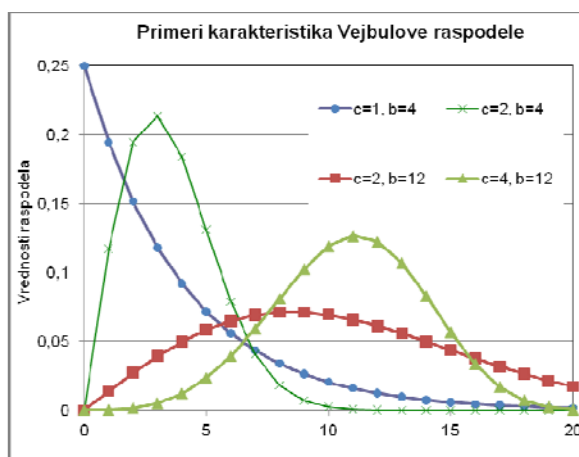
$$f(x) = \frac{c \cdot x^{c-1}}{b^c} \cdot e^{-\left(\frac{x}{b}\right)^c}, \quad (2)$$

gde je b srednja vrednost, a c parametar koji se zadaje. Promenom parametra c se menja oblik funkcije raspodele verovatnoće.

Na slici 1 su prikazane porodice karakteristika funkcija raspodele verovatnoće Normalne raspodele, a na slici 2 Vejbulove raspodele za različite parametre μ , σ , b i c .



Slika 1 – Normalna raspodela – primeri [4]



Slika 2 – Vejbulova raspodela – primeri [4]

Srednje vrednosti (ili aritmetička sredina skupa) μ i b se računaju na sledeći način:

$$\mu = b = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i, \quad (3)$$

gde je N broj elemenata skupa, a x_i i-ti član skupa.

Standardno odstupanje ili standardna devijacija σ se računa na sledeći način:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}, \quad (4)$$

gde je n broj elemenata u uzorku, μ je srednja vrednost i x_i i-ti član uzorka.

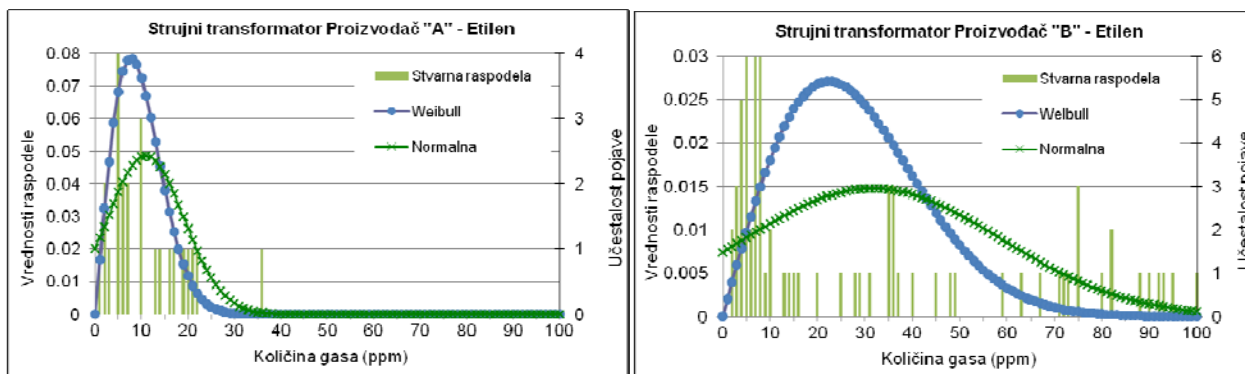
Za sve obrađene skupove podataka (uzorke) su parametri Normalne raspodele izračunati prema jednačinama (3) i (4), a za Vejbulovu raspodelu je parametar b izračunat iz jednačine (3), a za parametar c je uzeta vrednost 2. Na slikama koje slede prikaz stvarne raspodele je dat u kolonama (stubićima) kojoj su vrednosti učestalosti pojave dati na sekundanoj ordinatnoj osi, a karakteristike Normalne i Vejbulove raspodele su date u linijama sa vrednostima raspodele datim na primarnoj ordinatnoj osi.

Zbog ograničenog prostora biće prikazane raspodele za gasove etilen (C_2H_4) i etan (C_2H_6) koji su gasovi karakteristični za pregrevanje na visokim temperaturama (etilen) i na nižim temperaturama (etan), ali se kao prateći pojavljuju u određenim količinama i kod električnih pražnjenja. Biće prikazane raspodele za strujne i naponske transformatore 110 kV dva različita proizvođača.

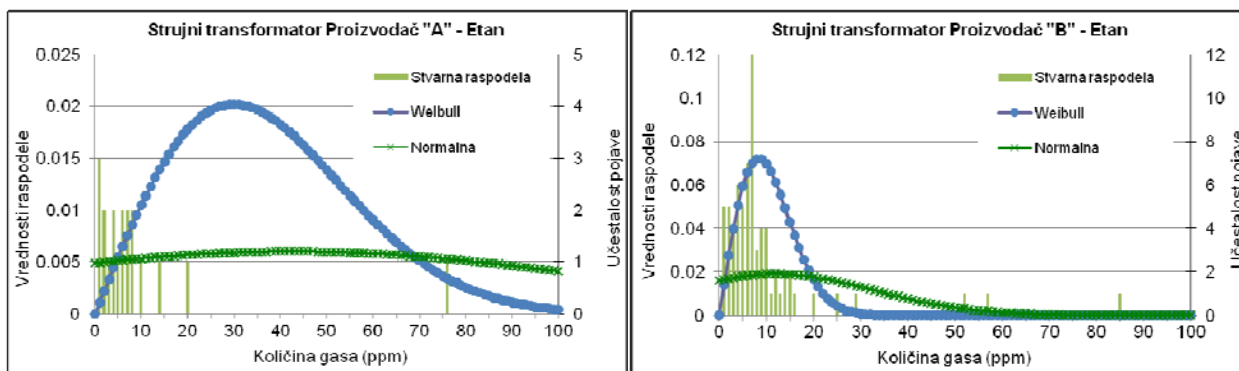
Kod strujnih i naponskih transformatora 110 kV proizvođača "A" je uzorak manji iz razloga što je prilikom provere stanja utvrđeno da kod ispitnog uzorka starijih nije bilo značajnijih količina gasova koji bi ukazivali na problem izuzev većeg broja sa parcijalnim pražnjenjima (isti ne ulaze u analizu), a isti su imali samo jedan kvar bez posledica po okolnu opremu. Nekoliko strujnih transformatora ima povišenu količinu etana i nekoliko naponskih povišenu količinu ugljen dioksida.

Kod proizvođača "B" uzorak je dosta veći, s tim da su i tu odabrani stariji merni transformatori uz odgovarajući uzorak manje starih kako bi se utvrdilo i njihovo stanje. I strujni i naponski transformatori proizvođača "B" obuhvataju seriju podtipova koji su u osnovi iste konstrukcijske izvedbe. Ovi tipovi su u prethodnom periodu imali veći broj kvarova koji su u nekim slučajevima uzrokovali i veću štetu na okolnoj elektroenergetskoj opremi. Veći broj strujnih i naponskih transformatora ima povećane količine etilena, a pored toga i velike količine ugljen monoksida i ugljen dioksida.

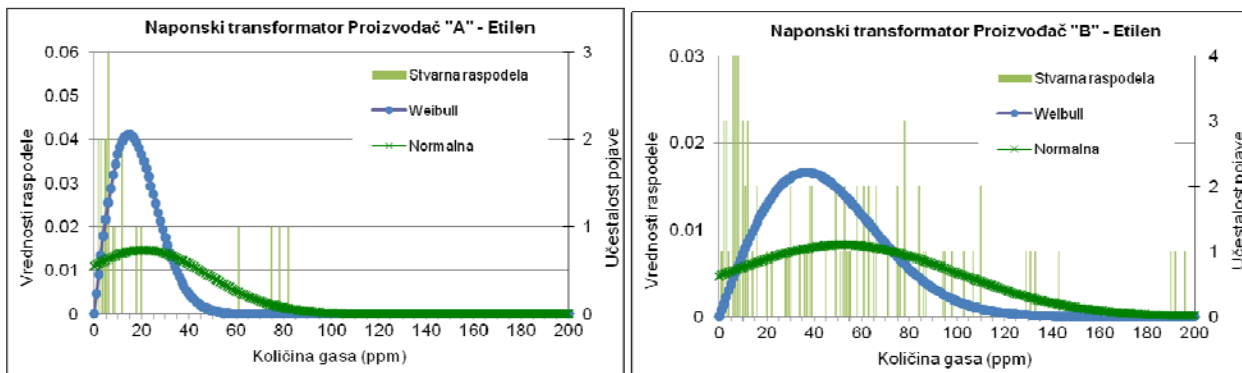
Na slikama 1 do 4 su prikazane stvarna, Normalna i Vejbulova raspodela.



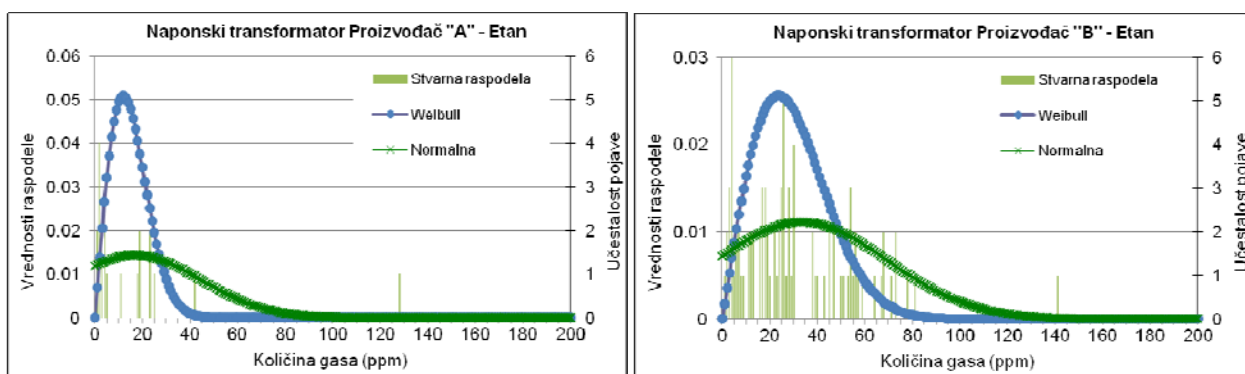
Slika 1 – ST proizvođača „A“ i „B“ etilen



Slika 2 – ST proizvođača „A“ i „B“ etan



Slika 3 – NT proizvođača „A“ i „B“ etilen



Slika 4 – NT proizvođača „A“ i „B“ etan

Analizirajući slike vidi se slabije slaganje normalne raspodele sa stvarnom raspodelom i bolje slaganje Vejbulove raspodele sa stvarnom raspodelom. Posmatrajući samo Vejbulovu raspodelu u odnosu na stvarnu vidi se da kod strujnih transformatora 110 kV proizvođača „B“ za etilen, proizvođača „A“ za etan i naponskih transformatora proizvođača „B“ za etilen ima značajnijih razlika u odnosu na stvarnu raspodelu. Očigledno je da postoji veliko rasipanje količina gasova za navedene primere što ukazuje na probleme u delu mernih transformatora.

Poređenje raspodela količina pojedinih gasova po proizvođačima i vrsti pokazuje veće ili manje razlike. Naponski transformatori 110 kV proizvođača „B“ očigledno imaju veće količine etana i etilena u odnosu na proizvođača „A“ čemu uzrok može biti konstrukcijska izvedba i time uzrokovano pregrevanje ulja i papirne izolacije.

Za oba proizvođača, za strujne i naponske transformatore 110 kV su određene gornje granice opsega 95 % tipičnih količina karakterističnih gasova iz obrađenog uzorka za obe raspodele. Vrednosti su prikazane u Tabeli 2.

Tabela 2 – Gornje granice opsega 95 % za dva karakteristična gasa za obrađeni uzorak

Količine su u ppm	Vejbulova raspodela		Normalna raspodela	
	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆
Strujni transformatori 110 kV proizvođača „A“	19	73	25	89
Strujni transformatori 110 kV proizvođača „B“	54	20	81	45
Naponski transformatori 110 kV proizvođača „A“	36	29	65	62
Naponski transformatori 110 kV proizvođača „B“	89	58	131	93

Vidi se velika razlika poredeći po raspodelama, a takođe i poredeći po vrsti mernih transformatora različitih proizvođača. Kod Vejbulove raspodele gornje granice se razlikuju za dva i više puta. Na ovaj način određene gornje granice su manje od granica određenih na način prikazan u [1] čiji su podaci dati u [3].

U Tabeli 3 su date preporučene maksimalne dozvoljene količine gasova za zaptivene merne transformatore bez potrebe da se bilo šta radi ukoliko su vrednosti ispod [1].

Tabela 3 – Maksimalno dozvoljene količine za zaptivene merne transformatore

Količine u ppm	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂
Merni transformatori	300	30	2	10	50	300	900

Poređenjem podataka Tabela 2 i 3 i slika 1 do 4 vidi se da su kod većeg broja strujnih i naponskih transformatora 110 kV, posebno kod proizvođača „B“, povišene količine etilena i etana. Prethodne analize gasova rastvorenih u ulju koje nisu uključivale statističku obradu, uzimajući u obzir učestale kvarove na pojedinim tipovima, dovele su do zaključka da je neophodno da se strujni i naponski transformatori 110 kV sa povećanim količinama etilena i etana, ali i ugljen monoksida i ugljen dioksida zamene tako da je 31 naponski i 78 strujnih transformatora 110 kV proizvođača „B“ koji su obuhvaćeni ovde statistički obrađenim uzorkom zamenjeno. Pored ovog izvršena je i zamena starih mernih transformatora 110 kV u trafostanicama koje su rekonstruisane ili su radovi u toku.

ZAKLJUČAK

Nakon nekoliko godina sprovođenja preventivnog održavanja i značajnih mera na održavanju strujnih i naponskih transformatora 110 kV se može pretpostaviti da su dale rezultate u smanjenju broja kvarova. Pretpostavka je da su tek sa zamenom značajnog broja strujnih i naponskih mernih transformatora uz prethodno obavljene reparacije i zamene (zbog curenja, parcijalnih pražnjenja i povišenog sadržaja vode) izostali kvarovi.

Neophodno je nastaviti sa preventivnim održavanjem koje uključuje sistematično praćenje parcijalnih pražnjenja i vršenje GH analiza ulja. Po mogućnosti vršiti i druga merenja. Rezervu strujnih i naponskih transformatora 110 kV održavati na optimalnom nivou.

Statističke raspodele gasova mogu biti korišćene za određivanje opsega tipičnih količina karakterističnih gasova i maksimalnih dozvoljenih količina preko kojih je neophodno preduzeti odgovarajuće mere. Ukoliko se ima dovoljno velik uzorak neophodno je odrediti opsege za pojedine tipove, a takođe i izvršiti statističku analizu obrađenog uzorka kako bi se izvukli odgovarajući zaključci. Standard [1] je vodič, ali lica zadužena za održavanje mernih transformatora moraju detaljnije analizirati različite podatke u cilju donošenja odgovarajućih odluka.

LITERATURA

1. IEC 60599:1999+A1:2007 "Mineral oil-impregnated electrical equipment in service - guide to the interpretation of dissolved and free gas analysis"
2. Dušan Obradović, "Iskustva u reparaciji mernih transformatora 110 kV", R-3.3 VI savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem – CIRED Srbija, 2008.
3. Dušan Obradović, "Detaljna analiza stanja nekoliko mernih transformatora 110 kV", R-3.5 VII savetovanje o elektrodistributivnim mrežama Srbije sa regionalnim učešćem – CIRED Srbija, 2010.
4. Siniša Spremić, "Održavanje transformatora 110/x kV – analiza rezultata merenja i ispitivanja", A2-13 - 30. savetovanje CIGRE Srbija, 2011.