

A2.08

**ЗНАЧАЈ КОНТРОЛЕ САДРЖАЈА ГАСОВА У УЉУ ТОКОМ ПРИЈЕМНИХ
ФАБРИЧКИХ ИСПИТИВАЊА ТРАНСФОРМАТОРА****THE IMPORTANCE OF DISSOLVED GAS ANALYSIS DURING FACTORY
ACCEPTANCE TESTS****Весна Радин, Бранка Ђурић, Ђорђе Јовановић, Милош Брдаревић***

Кратак садржај: Анализа садржаја гасова растворених у уљу се рутински користи као стандардна процедура контроле квалитета током фабричких тестова енергетских трансформатора. Пријемна фабричка испитивања (енг. *Factory Acceptance Test, FAT*) су последњи корак провере квалитета трансформатора пре него што напусти фабрику. У овом раду је описан значај одређивања садржаја гасова растворених у уљу у склопу фабричких испитивања трансформатора. Кроз приказ случајева из праксе описани су примењени протоколи анализе уља код нових и ремонтваних трансформатора. Дати су предлози за унапређење фабричких тестова код ремонтваних трансформатора у циљу верификације извршених радова пре изласка из фабрике и транспорта до места погона односно пре пуштања у погон.

Кључне речи: *FAT, уље, ацетилен, гас, дефект, квар*

Abstract: Dissolved gas analyses (DGA) of oil are routinely used as a standard quality control procedure during factory tests of power transformers. The factory acceptance tests (FAT) represent the final and critical step in ensuring quality before the transformer leaves the factory. This paper discusses the significance of dissolved gas analysis within the context of factory testing of transformers. Several cases demonstrating different oil analysis protocols applied to both, new and repaired transformers were presented. Recommendations are provided for enhancing the factory tests for overhauled transformers to verify the repairs conducted before they leave the factory and are put into operation.

Key words: *fat, oil, acetylene, gas, fault, defect*

1 УВОД

Концепт анализе гасова у трансформаторском уљу датира од педесетих година 20. века, период када су се наметнула два кључна аспекта развоја, а то су усавршавање гасне хроматографије као аналитичке методе и растућа потражња за поузданим

** Весна Радин, Електротехнички институт Никола Тесла, vesna.radin@ieent.org

Бранка Ђурић Електротехнички институт Никола Тесла, branka.djuric@ieent.org

Ђорђе Јовановић, Електротехнички институт Никола Тесла, djordje.jovanovic@ieent.org

Милош Брдаревић, ЕПС АД, Огранак ТЕНТ Б, milos.brdarevic@eps.rs

дијагностичким испитивањима трансформатора. Водеће компаније у производњи трансформатора, као што су *General Electric* и *Westinghouse*, значајно су повећале своју производњу како би удовољиле послератним захтевима. У том контексту, једна од раних примена гасне хроматографије била је усмерена на контролу квалитета током производних процеса. Ова контрола укључивала је спровођење високонапонских и тестова загревања.

Анализа гасова из трансформаторског уља показала се као изузетно корисна и брза метода за идентификацију термичких кварова, које могу настати као последица прегревања у намотајима, магнетном језгру или другим структурним елементима. Грејање унутар трансформатора се најлакше може пратити помоћу сензора распоређених у намотајима или уз помоћ гасно хроматографске анализе уља. Предност анализе уља је што ни на који начин не утиче на дизајн и перформансе трансформатора. Испитивање садржаја гасова у оквиру фабричких испитивања трансформатора, иако често перципирано као рутински процес, представља кључну активност у осигуравању функционалности и поузданости. Овакав приступ може довести до пропуштања прилике за правовремену идентификацију проблема и корекцију дефекта пре него што трансформатор напусти фабрику. У ту сврху погодно је ангажовање независног стручњака/лабораторије као сведока пријемних испитивања који би био спона између произвођача и власника трансформатора.

1.1 Шта су пријемна фабричка испитивања?

Пријемна фабричка испитивања, енг. *factory acceptance tests (FAT)*, представљају кључни аспект у обезбеђењу квалитета производа у индустрији трансформатора. То је у ствари завршна контрола у производњи трансформатора и служи као потврда квалитета производње од пројектовања, преко употребе квалитетних материјала до испуњености техничких карактеристика. Овај рад ће се фокусирати на примену гасне хроматографије у контексту пријемних испитивања, посебно у односу на три кључна теста: оглед празног хода, оглед загревања и диелектричне тестове. Постоје три основне групе испитивања у оквиру пријемних фабричких тестова: испитивања типа, рутинска или комадна испитивања и специјална испитивања. Испитивања типа подразумевају тестирање првог произведеног примерка новог типа трансформатора, чиме се проверавају промене материјала за израду или основног поступка израде. Рутинска испитивања се спроводе на сваком произведеном комаду, како би се гарантовао његов квалитет и спремност за оперативно коришћење. Специјална испитивања обухватају додатне тестове који допуњују рутинска и испитивања типа, с циљем свеобухватне процене квалитета.

Свако испитивање или тест који се изврши на трансформатору има своју сврху и значај, како за произвођача тако и за наручиоца и потребно их је спровести одговорно и са великом пажњом. Примена гасне хроматографије као допунског испитивања у оквиру фабричких тестова омогућава целовитију процену изолационог интегритета трансформатора пре предаје крајњем кориснику. Предмет овог рада је примена гасне хроматографије и њен допринос у верификацији квалитета израде трансформатора у склопу фабричких огледа. У том смислу фокус је на неколико пријемних фабричких тестова (огледа) и то: оглед празног хода, оглед кратког споја, оглед загревања и диелектрични тестови.

1.1.1 Оглед празног хода

Овај тест спада у рутинска испитивања што значи да се врши на сваком произведеном трансформатору. Један од највећих конструкционих изазова у производњи трансформатора је хлађење магнетног кола.

Топлотни губици у магнетном колу практично представљају губитке празног хода трансформатора и присутни су увек када је трансформатор прикључен на мрежу независно од нивоа оптерећења. Према томе, један од основних циљева при прорачуну, конструкцији и изради магнетног језгра је максимално смањење губитака у језгру, а кроз оглед празног хода се одређује колики губици су у питању. Приликом огледа празног хода мере се струје и снаге губитака трансформатора када је он са једне стране прикључен на трофазни напон док му је други намотај остао отворен. Управо ова карактеристика, снага губитака празног хода, је један од гарантованих параметара који су предмет уговора. Међутим, овај оглед има ограничења јер траје релативно кратко па може да се деси да се превиде локални дефекти у магнетном језгру трансформатора и управо ту велики допринос даје испитивање садржаја гасова у уљу.

Ако постоји прегревање или неки други дефект у језгру, резултати мерења садржаја гасова ће то показати.

1.1.2 Оглед кратког споја

Под овим огледом се подразумева струја и снага губитака кратког споја – режим када се трансформатор напаја трофазним напонам са једне стране док се друга напонска страна кратко спаја и напон подиже док се не постигне назначена (номинална) вредност струје и при томе мере губици. Губици у режиму кратког споја представљају губитке при оптерећењу, а то је, поред губитака празног хода, један од главних параметара које је неопходно верификовати у пријемним испитивањима трансформатора. На бази резултата огледа кратког споја израчунава се релативни напон кратког споја односно импеданса кратког споја која се касније током периода погона користи као параметар за контролу стања геометрије намотаја. Релативни напон кратког споја, односно импеданса кратког споја представља једну од основних карактеристика сваког трансформатора, налази се на његовој натписној плочици. И након овог теста је понекад упутно урадити анализу садржаја гасова у уљу као брзу и неинвазивну методу за детекцију евентуалног проблема.

1.1.3 Оглед загревања

Оглед загревања (енг. *Heat-run test*) се сврстава у испитивање типа и примењује на првом произведеном типу трансформатора. Оглед загревања представља симулацију погона трансформатора и сврха му је провера да ли ће при назначеним условима рада, порасти температура уља и намотаја у односу на амбијент (расхладни медијум), унутар дефинисаних граничних вредности. На основу измерених надтемпература добија се и податак да ли постоји и колика је резерва снаге трансформатора, односно да ли постоји могућност његовог повремених преоптерећивања током погона. Примена гаснохроматографске анализе уља пре и након овог теста, даје могућност за уочавање локалних прегревања насталих услед ефекта лутајућих струја (енг. *stray flux effects*), неодговарајуће пројектованог расхладног система или лоших-лабавих спојева [1]. Препорука је да се испитује садржај гасова у уљу непосредно пре загревања, уз услов од два сата претходне циркулације уља. Уколико испитивани трансформатор има форсирано хлађење путем уљних пумпи оне треба да су укључене и да постоји циркулација уља током целог периода огледа, све док се не узме последњи узорак уља. Пожељно је да други узорак буде око 24 часа по завршетку огледа грејања. Поред тога, у појединим случајевима препоручљиво је узимање узорка уља и у току трајања теста како би се адекватно пратио развој гасова уколико постоји.

1.1.4 Диелектрична испитивања

Диелектрична (напонска) испитивања представљају кључни аспект у анализи функционалности изолационих система у енергетским трансформаторима.

Ова испитивања могу бити реализована као типска, рутинска или као део специјализованих тестова, зависно од специфичних захтева и ситуација. Основна сврха ових испитивања је провера диелектричне издржљивости изолационог система, конструкције и израде намотаја, што је од основног значаја у контексту максималног радног напона намотаја трансформатора. Без обзира на категорију тестова, веома је важно спровести анализу садржаја гасова у узорцима уља пре почетка високонапонских испитивања, као и по завршетку свих диелектричних тестова. Ова процедура омогућава идентификацију потенцијалних проблема и осигурава безбедност и поузданост у раду трансформатора.

У сврху пријемних фабричких испитивања, трансформатор треба да буде монтиран у складу са стандардним условима рада, што подразумева инсталацију у пуном обиму, укључујући конзерватор, хладњаке, струјне трансформаторе и опрему за мониторинг. Редослед процедура пријемних испитивања је описан у међународним и интерним стандардима [2], а од кључне је важности да у току планирања буде узета у обзир могућа повезаност између појединих испитивања, као и њихов утицај на будуће резултате. Препоручује се да се испитивања трансформатора спроводе по принципу узлазно растућег оптерећења, почевши од нижих вредности напона и струја, чиме се значајно смањује ризик од могућег оштећења у току каснијих тестова, услед простих и лако отклоњивих недостатака.

2 ПРИМЕНА ГАСНЕ ХРОМАТОГРАФИЈЕ У ФАБРИЧКИМ ТЕСТОВИМА

Један од главних захтева међународних и домаћих стандарда, као и релевантних интерних процедура, подразумева обавезно узорковање и испитивање трансформаторског уља пре и после појединачних фабричких огледа. Ово је посебно значајно у контексту дуготрајних тестова, као што је оглед загревања трансформатора, где загревање уља може довести до генерисања одређене количине гасова. Стога је предуслов за извођење ових тестова дегазација уља, која се мора обавити пре сваког огледа. Након процеса дегазације, узима се узорак за гаснохроматографску анализу, како би се утврдиле почетне - референтне вредности присутних гасова. Овај почетни узорак такође подлеже контроли квалитета уља, што подразумева одређивање физичко хемијских и електричних карактеристика и садржаја воде. Испитивање гасова растворених у уљу служи као референтна тачка за праћење евентуалног развоја гасова током различитих огледа у оквиру пријемних тестова.

Услед јако ниских концентрација гасова који могу настати током фабричких тестова, идентификација врсте дефекта на основу односа гасова није примењива и може довести до грешке. Дијагностичко тумачење добијених гасова ослања се на детекцију малих, мерљивих количина и праћење брзине њиховог настајања, што је кључно за тачно одређивање стања трансформатора.

Тестови су дизајнирани тако да што верније симулирају погонске услове па тако и гасови који могу настати управо они који ће се формирати стављањем трансформатора у рад. Као продукти декомпозиције уља и деградације целулозе у погонским условима настаје водоник и угљоводонични гасови (метан, ацетилен, етилен и етан), а уз њих и угљен-моноксид и угљен-диоксид. Локална прегревања узоркују изузетно високе температуре које значајно повећавају брзину настајања гасова у односу на вредности пре теста. Због тога је од великог значаја почетно мерење гасова у уљу пре сваког фабричког огледа. Гас ацетилен не сме бити присутан ни у траговима јер је његово присуство знак за озбиљну забринутост [3,5].

Табела 1: Брзина настајања гасова [5]

Гас	Брзина формирања гасова (ppm/h)		
	Стање I: Нема уочених проблема	Стање II: Могућност проблема	Стање III: Сигуран дефект
Водоник	< 0,8	од 0,8 до 1,5	≥ 1,5
Сума гасова метана, етилена и етана	< 0,5	од 0,5 до 1,0	≥ 1,0
Угљен-моноксид	< 2,0	од 2,0 до 5,0	≥ 5,0
Угљен-диоксид	< 20,0	од 20,0 до 40,0	≥ 40,0

За настајање гаса ацетилена су потребне изузетно високе температуре од 800 °C до 1200 °C које су последица ослобађања енергије електричног лука односно електричног пражњења кроз уље [4]. Смернице за брзину настајања гасова током фабричких тестова описују три различита стања: I без уочених дефеката, II могући дефекти/проблеми и III сигуран дефект/проблем, Табела 1.

На основу вредности брзине формирања гасова и стања трансформатора дате су и смернице за даље поступање, Табела 2.

Табела 2: Стање трансформатора након фабричких тестова грејања [5]

	Стање I: Нема уочених проблема	Стање II: Могућност проблема	Стање III: Сигуран дефект
Потребна акција	Нема	Поновити мерење. Истражити узрок прегледањем осталих резултата. Обавестити власника трансформатора. Продужити време трајања теста.	Сигурно постојање термичког дефекта у трансформатору. Потребна је примена корективних мера и понављање целог теста.

Смернице дате у Табелама I и II се односе на тестове грејања међутим, како и током огледа празног хода, а и диелектричних испитивања може доћи до прегревања уља услед присуства дефекта сматра се да су наведене границе примењиве у свим пријемним тестовима.

Досадашња пракса испитивања код нас је таква да се садржај гасова насталих у уљу контролише најчешће после огледа загревања и/или диелектричних (напонских) испитивања. Нажалост, ови тестови често не успевају да открију кварове или пронађу мане у дизајну језгра трансформатора. Стога се препоручује извођење продуженог огледа празног хода – погона трансформатора у режиму празног хода, посебно код трансформатора највећих снага, који траје око 8 до 12 часова и омогућава уочавање потенцијалних недостатака у конструкцији магнетног кола. У случајевима ремонтованих или поправљених трансформатора, трајање овог теста је потребно продужити на неколико дана како би се осигурала потпуна верификација извршених радова.

У раду ће бити представљени конкретни примери из праксе где су примењивани различити протоколи узорковања и анализе уља у оквиру фабричких тестова. Описане су специфичности дијагностике на основу гаснохроматографске анализе уља након фабричких испитивања, дати су предлози за унапређење протокола пријемних тестова код ремонтованих трансформатора у циљу верификације извршених радова.

3 ПРИМЕРИ ИЗ ПРАКСЕ - ГАСНОХРОМАТОГРАФСКА АНАЛИЗА У ФАБРИЧКИМ ПРИЈЕМНИМ ИСПИТИВАЊИМА

Примена гаснохроматографских испитивања уља приликом фабричких тестова је посебно значајна и препоручљива код великих и поправљених/ремонтованих трансформатора пре и после било ког од тестова описаних у претходном поглављу. Ипак, протоколи узорковања уља могу бити различити у појединим случајевима у зависности од специфичних потреба и намене трансформатора, као и од претходних договора између власника опреме и произвођача. Циљ аутора овог рада је да представи неколико примера узорковања и испитивања уља у оквиру фабричких огледа, како на новим, тако и на ремонтованим трансформаторима, у циљу унапређења постојећих методологија и процедура у овој области.

3.1 Пример 1: Нов енергетски трансформатор 110/x kV

Контрола садржаја гасова у оквиру пријемних фабричких испитивања представља завршни корак у процесу осигурања поверења у квалитет производње нових трансформатора. У случају анализе овог конкретног трансформатора, спроведена су напонска испитивања и оглед загревања. Верификација стања трансформатора након фабричких тестова је потврђена уз помоћ анализе садржаја гасова у узорцима уља пре и након спроведених тестова, Табела 3.

Табела 3: Гаснохроматографска анализа уља [6]

Узорак	Гасови, ppm						
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљен-моноксид	Угљен-диоксид
Пре тестова	0	0	0	0	0	3	44
Након напонских испитивања	1	0	0	0	0	6	50
Након огледа загревања	1	0	0	0	0	9	76

Резултати анализе садржаја гасова код узорка уља након напонских тестова и огледа загревања је показала присуство угљеводоника и водоника у изузетно малим концентрацијама. Сума брзина формирања ових гасова у односу на почетно стање (пре тестова) је у границама које не упућују на постојање дефеката у трансформатору.

Међутим, потребно је напоменути да је и редослед испитивања веома важан, односно да огледи празног хода и загревања буду реализовани пре диелектричних испитивања, пошто последња могу бити потенцијално деструктивна.

3.2 Пример 2: Енергетски трансформатор 110/x kV и потенцијални проблем

Наредни пример такође описује протокол фабричких испитивања која су обухватала напонска испитивања и оглед загревања. Резултати гаснохроматографске анализе након појединачних тестова су приказани у табели 4 [7]. И у овом случају брзина формирања гасова не прелази граничне вредности иако је апсолутна вредност водоника нешто виша од уобичајене.

Табела 4: Гаснохроматографска анализа уља

Узорак	Гасови, ppm							Оцена
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљен-моноксид	Угљен-диоксид	
Пре тестова	0	1	0	0	0	77	124	/
Након напонских испитивања	8	1	0	0	0	99	117	/
Након огледа загревања	8	1	0	0	0	112	168	/
4 год. погона	19	39	0	75	11	606	497	Б(Т3)
4,5 год. погона	28	53	1	107	16	728	873	Б(Т3)

На основу добијених резултата донет је закључак да трансформатор задовољава за пуштање у погон. Трансформатор је монтиран на месту уградње и пуштен у погон. Потенцијално слабо место и ризик у оваквом протоколу фабричких огледа је недостатак лабораторијске провере садржаја гасова у уљу у оквиру огледа празног хода.

За овај трансформатор нема података о периодичној контроли трансформатора непосредно након пуштања у погон и у првој години рада. Прва испитивања у погону су извршена након четири године и показала су сумњу у постојање повећаног грејања, табела 4 (ред 4). Због недостатка историјских података о садржају гасова не може се коментарисати пораст гасова, али су ипак уочене повишене количине гасова етилена, метана, водоника и етана које нису типичне за нове трансформаторе на почетку погона.

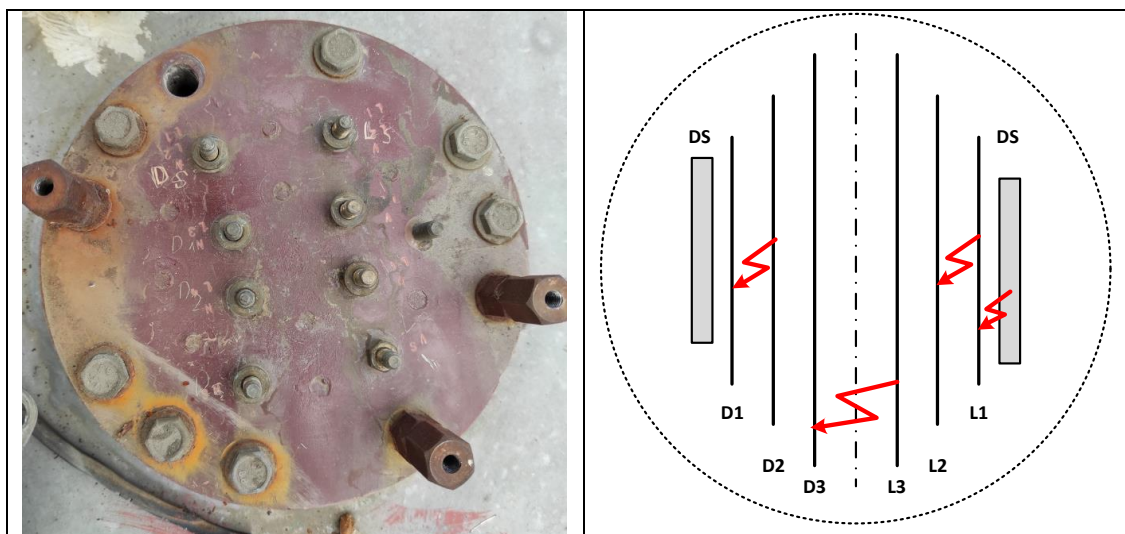
Однос концентрација наведених гасова указује на постојање прегревања у трансформатору са температуром топлот места изнад 700 °C. Пооштрена контрола садржаја гасова након шест месеци погона је потврдила претходну сумњу, а како је уочен даљи развој гасова препоручена су и адекватна електрична мерења. Карактеристично за услове рада овог трансформатора је да ради са веома малим оптерећењем од око 2 % што практично одговара раду у празном ходу. Како у оваквом режиму рада намотаји скоро да и нису оптерећени, велика је вероватноћа да се место прегревања налази у магнетном језгру. Трансформатор је искључен и премештен у фабрику у циљу утврђивања тачне локације квара.

Прегревање у магнетном језгру је проблем који је тешко утврдити електричним мерењима пре свега јер се мерења струја магнетнења и губитака празног хода на месту погона, због ограничених могућности мобилне опреме, обављају при сниженом напону. Са друге стране гаснохроматографска анализа уља може дати одговор на ово питање, онда када се ради. Оглед празног хода спада у рутинска испитивања што значи да се овај тест ради на сваком произведеном трансформатору. Међутим, ретко се ради гаснохроматографска анализа уља пре и после теста уз помоћ које би могле да се открију потенцијалне мане у језгру.

3.3 Пример 3: Трансформатор опште потрошње, 220/x kV

Резервни трансформатор опште потрошње, који је уз прекиде, био у погону око 23 године када је претпрео квар електричне природе. Трансформатор је искључен деловањем Бухолц релеја где је дошло до издвајања велике количине гасова. Гаснохроматографска анализа уља и слободних гасова из Бухолц релеја указивала је на постојање електричног пражњења велике густине енергије, Д2 [8].

Електричним испитивањима није утврђен квар на изолационом систему, али је приликом контроле изолованости магнетног језгра и притисних плоча уочено одсуство изолованости (кратак спој) између појединих сегмената, Слика 1 [9]. Такође је процењено да тај налаз није могао да буде узрок претходне продукције гасова квара.



Слика 1: Изглед прикључне кутије за уземљење магнетног кола и скицом позиције појединих прикључака и стања изолованости

Након тога, трансформатор је пуштен у празан ход где је после неколико сати поново дошло до искључења деловањем Бухолц релеја. Анализом резултата испитивања садржаја гасова утврђен је даљи развој гасова који се десио приликом рада у празном ходу због чега је претпостављено да је квар лоциран у магнетном језгру у горњој зони трансформатора. Трансформатор је послат у фабрику на отварање и детаљан визуелни преглед активног дела.

Приликом испитивања изолованости магнетног кола у фабрици откривени су спојеви делова магнетног кола као и страница ВН и НН. У току дефектаже извршени су оглед празног хода у трајању од 8 часова и напонска испитивања након којих је испитан и садржај гасова растворених у уљу, Табела 5 [10].

Табела 5: Гаснохроматографска анализа уља

Узорак	Гасови, ppm							Оцена
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљен-моноксид	Угљен-диоксид	
Пре тестова	2	1	5	1	0	23	258	/
Празан ход, 8h	8	1	7	2	0	27	333	Ц(Д1)
Напонска испитивања и празан ход (12h)	11	3	10	4	1	27	369	Ц(Д2)

Анализом резултата садржаја гасова из табеле 5 уочава се пораст гасова квара већ после 8 часова погона у режиму празног хода, а формирање гасова је настављено и после 12 часова и напонских испитивања. Апсолутне количине гасова нису високе, али брзина формирања гасова и појава ацетилена указивали су на присуство електричних пражњења. С обзиром да је до настајања гасова дошло приликом празног хода, закључено је да проблем у магнетном језгру није отклоњен.

Током ремонта је извршено преслагање магнетног језгра, а оглед празног хода и напонска испитивања су поновљени, табела 6 [11]. Оглед празног хода је у овој фази трајао 42 часа, а као што се види из табеле 6, уочава се и константан пораст свих гасова квара који су настали као последица електричних пражњења мале густине енергије.

Табела 6: Гаснохроматографска анализа уља након преслагања језгра

Узорак	Гасови, ppm						
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљен-моноксид	Угљен-диоксид
Пре тестова	2	0	0	0	0	20	113
Током празног хода	24	1	7	2	0	21	198
Након огледа празног хода	46	2	16	6	0	43	420
Након 42h празног хода и напон. испитивања	91	5	35	10	1	65	657

Анализом измерних количина гасова уочава се и пораст гаса ацетилена већ на почетку празног хода што је јасан знак да је у питању озбиљан дефект. Након додатних испитивања је установљена потреба за интервенцијом на намотајима ниског напона те су они замењени.

Након замене намотаја ниског напона и међунамотајне изолације извршен је још један оглед празног хода, табела 7 [11]. Према резултатима испитивања након огледа празног хода уочава се да је дошло до формирања гасова водоника, метана, ацетилена и етилена. Од наведених гасова као посебно проблематичан и забрињавајући је ацетилен за чији настанак је потребна изузетно висока температура. Иако ниска, измерена концентрација ацетилена указивала је на постојање дефекта у самом језгру. Са друге стране током овог теста нису уочене циркулационе струје у магнетном колу или друге аномалије.

Табела 7: Гаснохроматографска анализа уља након замене намотаја ниског напона

Узорак	Гасови, ppm						
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљен-моноксид	Угљен-диоксид
Пре тестова	2	0	0	0	0	6	68
24h режима празног хода	5	1	1	1	0	26	144
48h режима празног хода	2	1	0	0	0	19	102

У циљу добијања јасног увида у стање трансформатора, на предлог експерата Института Никола Тесла извршен је продужен оглед празног хода у трајању од пет дана, а резултати су приказани у табели 8 [12]. Јасна слика дефекта је уочена тек након три дана празног хода, а накнадним мерењима је и потврђена. Гаснохроматографском анализом уља је са великом сигурношћу потврђено стање из претходних тестова, односно да је дефект лоциран у магнетном језгру и да је електричне природе.

По завршетку огледа празног хода, уље је дегазирано, а затим је као последњи извршен оглед кратког споја, табела 9 [12].

Табела 8: Гаснохроматографска анализа уља током продуженог празног хода

Узорак	Гасови, ppm						
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљен-моноксид	Угљен-диоксид
Пре тестова	3	2	1	3	0	14	107
Дан 1	4	2	1	3	0	15	105
Дан 2	4	2	1	3	0	15	94
Дан 3	8	2	6	4	0	14	102
Дан 4	12	3	18	6	1	15	119
Дан 5	16	3	12	5	0	22	127

Табела 9: Гаснохроматографска анализа уља током огледа кратког споја

Узорак	Гасови, ppm						
	Водоник	Метан	Ацетилен	Етилен	Етан	Угљен-моноксид	Угљен-диоксид
Пре тестова	2	1	1	1	0	5	47
Дан 1	5	1	1	1	0	11	86
Дан 2	5	1	1	1	0	21	150
Дан 3	5	1	1	1	0	24	196

У узорцима уља по завршетку огледа није уочена значајна промена у количини гасова односно није дошло до развоја гасова током оптерећења намотаја. Примена гасне хроматографије у овом огледу је послужила као елиминациона метода тако да се са сигурношћу могло потврдити да је узрок квара проблем у магнетном колу и одлучено је да се изврши комплетна замена магнетног језгра.

4 ЗАКЉУЧАК

Анализом горе датих примера увиђа се значај контроле садржаја гасова пре и након фабричких испитивања. Искуство је показало да не постоји униформни протокол за спровођење овог испитивања. Узорци уља се често узимају као обједињени, односно између огледа грејања и диелектричних испитивања не постоји испитивање гасова у уљу, а оглед празног хода код нових трансформатора се ретко верификује испитивањем уља. Овим се постиже незнатна уштеда у времену, а са друге стране уколико се уочи стварање гасова у уљу, немогуће је утврдити који оглед је узрок те појаве.

Сваки од огледа у фабричким испитивањима има своју сврху и значај, а резултате огледа је потребно употпунити и хемијским испитивањима који ће потврдити квалитет изведених радова на трансформатору. Изостанком било ког од ових испитивања и квалитетне оцене резултата мерења прави се простор за потенцијални дефект који ће се испољити касније у погону.

Искуство показује да је врло тешко приликом пријемних испитивања и спроведеног огледа загревања открити евентуалну мањкавост дизајна магнетног језгра која ће се касније скупо плаћати проблемима током погона које је врло тешко санирати.

Ремонтовани или поправљени трансформатори су посебно рањива категорија јер је услед година погона њихов изолациони систем и активни део већ делимично ослабљен. Управо због тога је је код њих посебно значајно спровођење детаљних испитивања укључујући и продужено трајање огледа празног хода у трајању од 5 до 7 дана. На овај начин, уз праћење развоја гасова у уљу током теста омогућава се правовремена детекција скривених слабости у језгру.

Руковођени горе описним случајевима намеће се потреба за независним стручњаком који има задатак да врши надзор над фазама фабричких тестирања што доприноси транспарентности и поверењу у квалитет. За произвођача и за власника трансформатора је погодно је се пријемна фабричка испитивања обаве јасно дефинисаним процедурама и редоследом и у сарадњи са независним дијагностичким стручњацима.

Добар експерт је овде практично у улози инспектора који ће своју пажњу, вештине и знање усмерити на квалитетно и одговорно спровођење фабричких испитивања.

Осигуравајући да су сви параметри испитивања у складу с предвиђеним спецификацијама, инспектор игра кључну улогу у минимизирању ризика од неправилности и унапређењу безбедности.

Закључно, пријемна фабричка испитивања трансформатора представљају незаобилазни корак у процесу обезбеђења квалитета. Систематичним спровођењем испитивања типа, рутинских и специјалних тестова, уз примену савремених метода као што је гасна хроматографија, произвођачи могу бити уверени у поузданост и ефикасност својих производа. На тај начин, ови тестови не само да осигуравају квалитет, већ и доприносе поверењу у производе који доспевају на тржиште, чиме се подиже укупни стандард индустрије трансформатора.

5 ЛИТЕРАТУРА

- [1] SRPS EN 60076-2:2011 Енергетски трансформатори – Део 2: Пораст температуре код трансформатора уроњених у течност
- [2] ЕПС ИС 09-1:2014 Пријемна испитивања енергетских трансформатора, ЕПС интерни стандард
- [3] IEC 61181:2007 second edition, Mineral oil-filled electrical equipment – Application of dissolved gas analysis (DGA) to factory tests on electrical equipment
- [4] SRPS EN IEC 60599:2022 ED4 Електрична опрема у погону пуњена минералним уљем – Упутство за тумачење резултата
- [5] IEEE PC57.130/D17 Trial-Use Guide for the Use of Dissolved Gas Analysis During Factory Temperature Tests for the Evaluation of Oil-Immersed Transformers and reactors
- [6] Фондовска документација ИНТ: Извештај број 424528-Л Испитивање уља из енергетског трансформатора
- [7] Фондовска документација ИНТ: Извештај број 420270-Л Испитивање уља из енергетског трансформатора
- [8] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 422442-Л Испитивање уља из енергетског трансформатора

- [9] Фондовска документација ИНТ/ЕПС: Извештај број 422536-Л Испитивање трансформатора
- [10] Фондовска документација ИНТ: Извештај број 423062-Л Испитивање уља из енергетског трансформатора
- [11] Фондовска документација ИНТ: Извештај број 423350-Л Испитивање уља из енергетског трансформатора
- [12] Фондовска документација ИНТ: Извештај број 425026-Л Испитивање уља из енергетског трансформатора