

РОЗДІЛ IV. ЕНЕРГЕТИКА, ЕЛЕКТРОТЕХНІКА ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКА

DOI: 10.25140/2411-5363-2023-3(33)-180-197

УДК 621.314.222.6:621.319.48:621.311:621.89:662.753

Сергій Зайцев¹, Валентин Тіхенко²

¹кандидат технічних наук, інженер кафедри атомних електростанцій
Національний університет «Одеська політехніка», (Одеса, Україна)
E-mail: sdjavdet@ukr.net ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

²доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри цифрових технологій в інжинірингу
Національний університет «Одеська політехніка», (Одеса, Україна)
E-mail: vntikhenko@gmail.com ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ДІАГНОСТУВАННЯ АВТОТРАНСФОРМАТОРА ІЗ ЗОВНІШНІМ ТА ВНУТРІШНІМ ДЕФЕКТОМ У ВИСОКОВОЛЬТНОМУ УВОДІ

Наведено результати діагностування оливнонаповненого силового автотрансформатора АТДЦТН-200000/330/110/10 із зовнішнім та внутрішнім дефектом в оливнонаповненому високовольтному вводиті ГМТПА-45-330/1000 У1. Досліджено: електричні характеристики для цього електрообладнання та фізико-хімічні характеристики проб трансформаторних олив; вплив імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій розчинених у мінеральній трансформаторній оливі діагностичних компонентів CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , H_2O у присутності розчиненого H_2 . Отримані результати досліджень дозволяють підвищити надійність діагностування оливнонаповненого силового автотрансформатора із зовнішнім та внутрішнім дефектом в його оливнонаповненому високовольтному вводиті.

Ключові слова: електротехнічне обладнання; трансформаторна олива; електричний трансформатор; розчинені гази; присадка «Іонол»; фуранові сполуки; хроматографія.

Табл.: 7, Рис.: 3, Бібл.: 33.

Актуальність теми дослідження. Надійність сучасних систем виробництва, розподілу та споживання електроенергії значною мірою залежить від надійності оливнонаповненого високовольтного електротехнічного обладнання (ОВЕО). Ушкодження ОВЕО із паперово-оливою електричною ізоляцією (ПОЕІ) призводять до економічної шкоди в енергетичних системах [1]. Аварії, пов'язані з електричним пробом електричної конденсаторної ізоляції високовольтних введів, є найбільш частими і економічно витратними в обладнанні об'єктів електроенергетики [2, 3]. Вимоги до технічного обслуговування ОВЕО з урахуванням його поточного стану визначають необхідність удосконалення систем технічного контролю та діагностування такого обладнання [4]. Визначення технічного стану ОВЕО з ПОЕІ необхідне для: прийняття рішень, пов'язаних з експлуатацією, технічним обслуговуванням та ремонтом цього обладнання; інженерного та економічного моделювання щодо найбільш рентабельної альтернативи для відновлення або підтримки в робочому стані обладнання [5]. Таким чином, удосконалення методів контролю технічного стану та діагностування ОВЕО з ПОЕІ є актуальним, що дозволяє вирішувати завдання контролю технічного стану, пошуку місця та визначення причин відмови (несправності), прогнозування технічного стану цього обладнання на основі відповідного діагностичного забезпечення.

Постановка проблеми. Характерні внутрішні дефекти в оливнонаповнених силових високовольтних електричних трансформаторах (автотрансформаторах) (далі за текстом – ОСВЕТ) виникають у таких функціональних системах, як: а) ізоляційна: (головна ізоляція, поздовжня ізоляція, ізоляція відводів, електростатичні екрани); б) електромагнітна: (остов, структурна ізоляція обмоток, елементи кріплення, магнітні шунти та екрани, ланцюг заземлення); в) струмопровідна: виводи електричних обмоток [6, 7]. При цьому

на виникнення та розвиток внутрішніх дефектів можуть впливати такі фактори, як: строк служби; електричне навантаження; пошкодження елементів високовольтних уводів, що занурені в мінеральну трансформаторну оливу (далі – МТО) трансформатора або автотрансформатора; режим роботи; зовнішні короткі електричні замикання; проникнення діагностичних газів з бака контактора перемикача електричних обмоток трансформатора (автотрансформатора) під електричним навантаженням у бак трансформатора (автотрансформатора); пошкодження насосів перекачування МТО системи охолодження; технологічне оброблення МТО [6, 7]. Таким чином, є необхідність в постійному удосконаленні методів визначення та ідентифікації внутрішніх дефектів в ОСВЕТ за допомогою відповідних методів діагностування такого електрообладнання для подальшого визначення та прогнозування його технічного стану.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Основними діагностичними параметрами під час контролю технічного стану ОВЕО з ПОЕІ є: а) для оливонаповненого силового автотрансформатора (ОСАТ) – електричний опір електричної ізоляції; тангенс кута діелектричних втрат електричної ізоляції; електрична ємність електричних обмоток; коефіцієнт абсорбції; фізико-хімічні, теплофізичні, електрофізичні властивості мінеральної трансформаторної оливи (МТО) [8, 9]; вміст розчинених діагностичних газів H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , O_2 , N_2 , повітря (далі – діагностичні гази) у МТО [6, 10]; б) для оливонаповненого високовольтного уводу (ОВУ) з ПОЕІ – електричний опір електричної ізоляції; тангенс кута діелектричних втрат електричної ізоляції; електрична ємність електричної ізоляції; фізико-хімічні, теплофізичні, електрофізичні властивості МТО [8, 11]; вміст розчинених діагностичних газів у МТО [6, 10].

Методами хроматографії визначають у МТО вміст таких розчинених діагностичних компонентів, як: розчинені діагностичні гази [12, 13]; присадка «Іонол» [14, 15]; фуранові сполуки 2-фуриловий спирт (2FOL), 2-фурфурол (2FAL), 2-ацетилфуран (2ACF), 5-метил-2-фурфурол (5MEF) (далі – фуранові сполуки) [16, 17].

Діагностування ОСАТ або ОВУ з ПОЕІ за результатами аналізів проб МТО методами газової хроматографії (ГХ) виконують при визначенні в МТО вмісту розчинених діагностичних газів [6, 7], присадки «Іонол» [11], фуранових сполук [6, 18] з використанням відповідних діагностичних моделей [6].

Діагностичні моделі, засновані на результатах дослідження у пробах МТО вмісту розчинених діагностичних газів, дозволяють визначати в ОСАТ або ОВУ з ПОЕІ: дефекти термічного та/або електричного характеру [19]; можливу присутність у МТО X-воску, окислювальне старіння МТО; піроліз та карбонізацію МТО; накопичення частинок вуглецю в МТО [6]. При цьому використовують: результати визначення поточних концентрацій розчинених діагностичних газів у МТО та швидкостей їх накопичення; методи «граничних рівнів концентрацій», «відносин концентрацій характерних газів», у тому числі «табличний метод», «метод графічних образів дефектів», «метод визначення швидкості збільшення концентрацій діагностичних газів у МТО» [6, 7]. За результатами досліджень вмісту в МТО розчинених діагностичних газів можливе виявлення дефектів залежно від місця їхнього прояву у відповідних функціональних системах при дослідженні: а) ОСАТ з ПОЕІ – для ізоляційної функціональної системи; електромагнітної функціональної системи; струмопровідної функціональної системи [6]; б) ОВУ з ПОЕІ – часткові електричні розряди; електричні іскріння в механічно ослабленому з'єднанні вимірювального виводу; повзучі електричні розряди вздовж поверхні остова та покришки; діелектричне перегрівання електричної ізоляції; наявність електричного контуру з великим електричним струмом у головці ОВУ з коротким електричним замиканням [20].

У середовищі іонізованого водню в об'ємі МТО в ОСАТ і ОВУ з ПОЕІ можливе утворення газів та X-воску, що призводить до зниження електричної міцності МТО [21, 22].

При виникненні імпульсів часткових електричних розрядів у локальних об'ємах МТО генеруються: сферичні ударні хвилі; імпульси електричного струму, світіння; плазмохімічні реакції в бульбашках газів, що утворилися, під дією ударних хвиль [1, 20]; акустичні ефекти. Всі ці процеси можуть призвести до деградації МТО і домішок, що утворилися в МТО – органічних кислот, спиртів, альдегідів, кетонів, фуранових сполук [20, 22]. При цьому: перевищення концентрацій CO та CO₂ вище граничних значень вказує на інтенсивні окислювальні процеси в об'ємі МТО при перегріванні ПОЕІ в ОВУ; при незадовільних результатах електричних випробувань ОВУ рекомендовано визначати в МТО вміст фуранових сполук: якщо їх сумарний вміст більше 1 мг/кг, то передбачається наявність дефекту, пов'язаного з перегріванням ПОЕІ в ОВУ [6].

Фуранові сполуки утворюються при деградації ПОЕІ в ОСАТ або в ОВУ під впливом електричних і теплових полів у середовищі МТО і є нестійкими речовинами та швидко розкладаються під дією температури в МТО [21]. Найбільш стійкою фурановою сполукою є 2FAL, значення концентрацій якої використовують для оцінювання технічного стану ПОЕІ [18].

Відомі результати дослідження в лабораторних умовах впливу електричної напруги на деградацію МТО та ПОЕІ з утворенням в об'ємі МТО розчинених діагностичних газів та фуранових сполук: при цьому вплив електричної напруги на деградацію фуранових сполук в об'ємі МТО не досліджено [23].

Відомий метод визначення газостійкості ізоляційних рідин під дією на них електричної напруги та іонізації, при цьому кількісно-якісний склад газів, що утворюються, у тому числі розчинених у трансформаторних оливах, не досліджується [24].

Найбільш вірогідні внутрішні дефекти виникають у таких функціональних системах в ОСВЕТ, як ізоляційна, електромагнітна, струмопровідна [1, 6].

Наведена інформація в літературних джерелах [1–24] вказує на неповноту відомостей про вплив: дефектів в ОВУ з ПОЕІ, що має зовнішні та внутрішні дефекти електричного та/або теплового характеру та стикається своєю зовнішньою поверхнею з МТО в ОСАТ, на достовірність діагностування дефектів, пов'язаних з внутрішніми конструктивними елементами власне самого ОСАТ із ПОЕІ; імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій вже розчинених у МТО таких діагностичних компонентів, як CH₄, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆, CO₂, CO, H₂O, фуранові сполуки, присадка «Іонол», у присутності розчиненого H₂, який утворюється при деградації МТО. Усе це вимагає виконання відповідних досліджень.

Виділення недосліджених частин загальної проблеми. Попри наявності великої кількості досліджень методів діагностування ОСВЕТ, виявлення внутрішніх дефектів в такому електрообладнанні із урахуванням впливу на достовірність результатів діагностування зовнішніх та внутрішніх дефектів в ОВУ, що знаходяться у контакті із МТО в середині ОСВЕТ, є необхідністю для забезпечення надійності при експлуатації такого електрообладнання.

Мета статті. Головною метою статті є підвищення надійності результатів діагностування оливонаповнених силових високовольтних електричних автотрансформаторів із зовнішнім та внутрішнім дефектом у їх оливонаповнених високовольтних уводах із паперово-оливою електричною ізоляцією, що знаходяться в контакті з трансформаторною оливою в середині таких автотрансформаторів, з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб мінеральної трансформаторної оливи з такого електрообладнання.

Завдання дослідження: 1. Дослідження технічних станів ОСАТ та його пошкодженого ОВУ на підставі результатів: а) електричних випробувань електрообладнання;

б) ГХ аналізів проб МТО з електрообладнання; в) візуального огляду зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів пошкодженого ОВУ після його вилучення із ОСАТ. 2. Дослідження: а) фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей МТО в ОСАТ та у його пошкодженому ОВУ; б) взаємних зв'язків між концентраціями розчинених діагностичних компонентів у МТО в ОСАТ та у його пошкодженому ОВУ залежно від тривалості їх експлуатації; в) впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених у МТО діагностичних компонентів CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , H_2O у присутності розчиненого H_2 .

3. Встановлення алгоритму дій при діагностуванні ОСАТ та його ОВУ з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб МТО з такого електрообладнання.

Виклад основного матеріалу. Об'єкти досліджень: методи діагностування технічного стану ОСАТ та його ОВУ на підставі результатів фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних, ГХ аналізів та випробувань проб МТО з цього оливонаповненого електрообладнання. Предмети досліджень: ОСАТ типу АТДЦТН-200000/330/110/10 та ОВУ типів ГМТПА-45-330/1000 У1 і ГМТА-90-110/2000 У1 (герметичне електрообладнання); МТО марок ГК; розчинені в МТО діагностичні компоненти: діагностичні гази (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , O_2 , N_2 , ЗВП (загальний вміст повітря), ЗВГ (загальний вміст газів); присадка «Іонол»; фуранові сполуки 2FOL, 2FAL, 2ACF, 5MEF та сума їх концентрацій ΣC_F ; H_2O .

При дослідженні електричних характеристик ОСАТ та його ОВУ використано засоби вимірювальної техніки (ЗВТ) та випробувальне обладнання: мегаомметр ЭС0202/2Г та електричні мости змінного струму типу СА7100-2 та типу Р5026 [4, 5]. Досліджувані електричні характеристики: а) для ОСАТ: R_{60} і R_{15} – електричний опір електричної ізоляції, виміряний через 60 с і 15 с після появи на об'єкті вимірювання електричної напруги, відповідно, МОм; коефіцієнт абсорбції K_a ; тангенс кута діелектричних втрат електричних обмоток, $\text{tg}\delta$, %; електрична ємність C електричних обмоток, пФ [8, 9]; б) для ОВУ: тангенс кута діелектричних втрат основної електричної ізоляції $\text{tg}\delta_1$, %; електрична ємність C_1 основної електричної ізоляції, пФ; електричний опір R_i спеціального виведення, МОм; тангенс кута діелектричних втрат електричної ізоляції вимірювального конденсатора $\text{tg}\delta_2$, %; електрична ємність C_2 електричної ізоляції вимірювального конденсатора, пФ; електричний опір R_2 вимірювального виведення, МОм [8]. Газовий хроматограф «Кристал-2000М» використаний для визначення в МТО: а) вмісту $C_{i,m}$ (ppm) i -х розчинених діагностичних газів, ЗВП, ЗВГ – за методиками [12, 13]; б) вмісту C_i , % маси (далі – % мас.) присадки «Іонол» – за методиками [11, 14]; в) вмісту C_F (мг/кг) розчинених фуранових сполук та суми їх концентрацій ΣC_F (мг/кг) – за методиками [16, 17]. Досліджувані характеристики проб МТО з ОСАТ та ОВУ: пробивна напруга U (кВ) [11]; температура спалаху парів МТО у закритому тиглі t_{cn} (°C) [11]; кислотне число (КЧ), (мг КОН на 1 г МТО) [11]; водорозчинні кислоти (ВРК) (мг КОН на 1 г МТО) [10]; тангенс кута діелектричних втрат $\text{tg}\delta_{MTO}$ (%) [11]; щільність ρ (г/см³) [11]; вміст води W (г/г) [11]; вміст $C_{i,m}$ (ppm) розчинених діагностичних газів, ЗВП, ЗВГ [12, 13]; вміст C_i (% мас.) присадки «Іонол» [11, 14]; вміст C_F (мг/кг) фуранових сполук та суми їх концентрацій ΣC_F (мг/кг) [16, 17]. Пороги визначення в МТО діагностичних компонентів відповідають вимогам [11, 12, 16]. При дослідженні впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених у МТО діагностичних компонентів CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , H_2O у присутності розчиненого H_2 : попереднє насичення МТО газоподібним H_2 та розчиненими газами CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO виконано при температурі 20 °C за методиками [12, 13] до концентрації H_2 у цьому МТО на рівні 5 % об'ємних (далі – % об.) з використанням пристрою, аналогічного наведеному

у роботі [25]; вимірювання виконані за методикою [11, 26] при кількості електричних пробоїв $N = 144$. Відбір проб МТО для визначення вмісту в них розчинених газів виконано послідовно через кожні $N=36$ електричних пробоїв. При виконанні досліджень використано установку для випробування олив УИМ-90 з автоматичним періодичним перемішуванням об'єму МТО. При цьому: випробувальна комірка накрита електроізолюючою кришкою; газовий простір над МТО заповнений воднем і з'єднаний з атмосферним повітрям через рідинний затвор.

Для діагностування досліджених ОСАТ та ОБУ застосовані методи: електричних вимірювань; «табличний метод»; метод «графічних образів дефектів»; метод «ЕТРА (Electric Technology Research Association)»; метод «Трикутник Дюваля» [6, 8].

Дослідження технічних станів ОСАТ та його пошкодженого ОБУ на підставі результатів їх електричних випробувань. Досліджений ОСАТ: маса МТО 67000 кг; введено в експлуатацію в 1992 р. Через 214 місяців після введення в експлуатацію виконані електричні випробування ОСАТ щодо показників R_{60} , R_{15} , K_a , $tg\delta$, C , відповідно до вимог нормативних документів [8, 9]. Результати виконаних електричних випробувань показали, що ОСАТ відповідає нормам, справний та працездатний [8, 9], та результати аналізів проб МТО з ОСАТ за методами ГХ вказують на наявність у ньому внутрішнього дефекту (табл. 2). Одночасно виконані електричні випробування ОБУ типів ГМТПА-45-330/1000У1 (фази «А» та «С») та ГМТА-90-110/2000У1 (фази «А», «В» та «С») при визначенні показників $tg\delta_1$, $tg\delta_2$, R_i , R_2 , C_1 , C_2 показали, що досліджені ОБУ справні та працездатні і відповідають нормам [8]. Одночасно виконані електричні випробування ОБУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В» при визначенні показників $tg\delta_1$, $tg\delta_2$, R_i , R_2 , C_1 , C_2 показали, що: показники $tg\delta_1 = 1,546\%$ (норма $tg\delta_1 = 0,15-1,0\%$) та $tg\delta_2 = 5,008\%$ (норма $tg\delta_2 < 1\%$) не відповідають нормам [8]; ОБУ несправний і визнаний таким, що має пошкодження [8].

Дослідження фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей МТО в ОСАТ та в його пошкодженому ОБУ. Результати цих досліджень показали, що для ОСАТ показники ρ , $KЧ$, $ВРК$, t_{en} , W , U , $tg\delta_{МТО}$ при $90\text{ }^\circ\text{C}$, C_i відповідають нормам [11]. Результати визначення сумарного вмісту фуранових сполук ΣC_F у МТО у процесі експлуатації ОСАТ показали, що їх концентрації не перевищували нормовані значення порогів визначення $C_{F,min} = 0,2$ мг/кг для МТО [16, 17]. Це свідчить про те, що ПОЕІ в ОСАТ не зазнала деструкції [27, 28]. Вміст присадки «Іонол» зменшився від значення $C_i = 0,35\%$ мас. до значення $C_i = 0,31\%$ мас. і відповідає нормі [11].

В табл. 1 наведено результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО із пошкодженого ОБУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В».

Таблиця 1 – Результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО із пошкодженого ОБУ

Δt_1 , місяць	ρ , г/см ³	КЧ, мг КОН/г	t_{en} , °C	W, г/т	U, кВ	$tg\delta_{МТО}$, % (70 °C/90 °C)	C_i , % мас.
Норма	нв	<0,1	>135	<20	>55	<2,5/5,0	>0,1
120*	0,853	0,005	138	12,3	57	2,0/н	0,34
1	0,854	відс.	138	11,2	56	1,0/н	0,34
94	0,852	відс.	138	15,4	52**	2,96/5,1**	0,22

Примітки: * – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОБУ в ОСАТ, місяць; Δt_1 – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО із ОБУ, місяць; відс. – числове значення менше порога визначення показника відповідним ЗВТ; ** – значення, що не відповідають нормам та передбачають наявність дефектів; н – вимір не виконувався; нв – показник не визначається за вимогами [11]

Джерело: розроблено авторами

Результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО із пошкодженого ОБУ показали (табл. 1), що: показник $tg\delta_{МТО}(70\text{ }^{\circ}\text{C}/90\text{ }^{\circ}\text{C}) = 2,96/5,1$ не відповідає нормам; вміст води збільшився від значення $W = 11,2$ г/т до $W = 15,4$ г/т; показник $U = 52$ кВ не відповідає нормам; вміст присадки «Іонол» зменшився від значення $C_i = 0,35\%$ мас. до значення $C_i = 0,22\%$ мас. і відповідає нормі [11].

Дослідження взаємозв'язків між концентраціями розчинених діагностичних компонентів у МТО в ОСАТ та у його пошкодженому ОБУ залежно від тривалості їх експлуатації. У табл. 2 представлені результати аналізів за методами ГХ проб МТО із ОСАТ.

Таблиця 2 – Результати аналізів за методами ГХ проб МТО із ОСАТ

Δt_2 , місяць	Концентрація, $C_{i,m}$, ppm								CO ₂ /CO
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	CO	ЗВГ	
1 рівень	<100	<50	<0,5	<15	<50	<1500	<150	<20000	3–10
2 рівень	100– 150	50– 120	0,5–10	15– 100	50– 100	1500– 3500	150– 350	20000– 40000	
3 рівень	>150	>120	>10	>100	>100	>3500	>350	>40000	
187*	відс.	1,8	відс.	11,1	3,1	104	9,3	0,59	11,2**
0,3	відс.	2,7	відс.	18,9**	3,8	392	29	0,87	13,5**
1	1,3	3,2	відс.	23**	4,4	678	43	1,43	15,8**
3	43,9	6,4	відс.	24,8**	4,1	817	56	0,93	14,6**
0,5	45,8	6,7	відс.	28,7**	4,2	955	60	1,05	15,9**
6	51,6	8,1	відс.	28,7**	4,7	1261	91	0,94	13,9**
0,4	44,9	8,2	відс.	27,7**	4,6	1238	92	1,48	13,5**
5	98,8	9,7	відс.	27,9**	5	1430	127	2,6**	11,3**
6	582**	22,3	0,7	24,6**	5,5	1566**	88	1,73	17,8**
0,4	612**	25,1	0,4	25,5**	5,8	1637**	104	1,8	15,7**
0,33	588**	26,4	0,3	27,5**	7,1	1711**	107	3,18**	16,0**
3	28 ^a	3,6 ^a	відс. ^a	8,9 ^a	2,3 ^a	660 ^a	27 ^a	1,42 ^a	нв

Примітки: * – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОСАТ, місяць; Δt_2 – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО із ОСАТ, місяць; 1–3 рівні – граничні рівні концентрацій розчинених газів, що характеризують технічний стан ОСАТ [6]; ** – значення, що не відповідають нормам та передбачають наявність дефектів; ^a – концентрації діагностичних газів у МТО після заміни пошкодженого ОБУ; відс. – числове значення менше за поріг визначення вимірюваного показника відповідним ЗВГ; нв – розрахунок не виконується за вимогами [6].

Джерело: розроблено авторами

З табл. 2 випливає, що: залежно від тривалості експлуатації ОСАТ значення концентрацій діагностичних розчинених в МТО газів H₂, CO₂, CO постійно збільшуються, а концентрація розчиненого в МТО діагностичного газу C₂H₄ практично залишається постійною; числові значення діагностичних газів H₂, C₂H₄, CO₂ в МТО перевищують норми, при цьому відносини CO₂/CO поза нормою [6]; після заміни пошкодженого ОБУ на працездатний ОБУ аналогічного типу, концентрації всіх діагностичних газів в МТО в ОСАТ відповідають нормам [6]. Це вказує на відсутність внутрішніх дефектів в ОСАТ і вплив пошкодженого ОБУ на концентрації розчинених в МТО діагностичних газів H₂, C₂H₄, CO₂ до його заміни на працездатний ОБУ.

В табл. 3 наведено результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОБУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В».

Таблиця 3 – Результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОВУ

Δτ ₃ , місяць	Концентрація, C _{i,m} , ppm								CO ₂ /CO
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO ₂	CO	ЗВГ	
ГР	600	140	1	30	60	3000	800	60000	3–10
120*	160	35	відс.	1,2	14	1840	250	1,71	7,4
1	170	39	відс.	8,4	11	1860	260	1,82	7,2
33	147	48,4	відс.	5,9	11	1107	127	2,59	8,7
55	43887**	14560**	відс.	5,9	1536**	982	8,0	8,52**	122,8**

Примітки: ГР – граничний рівень; * – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОВУ в ОСАТ, місяць; Δτ₃ – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО з ОВУ до ОСАТ, місяць; ** – значення, що не відповідають нормам [6] та передбачають наявність дефектів; відс. – числове значення менше за поріг визначення вимірюваного показника відповідним ЗВГ.

Джерело: розроблено авторами

З табл. 3 випливає, що залежно від тривалості експлуатації ОВУ значення концентрацій розчинених діагностичних газів H₂, C₂H₂, C₂H₄, C₂H₆ в МТО практично не змінюються до моменту виявлення у цьому уводі дефектів на підставі електричних випробувань. Перед виведенням ОВУ з роботи, пов'язаного з незадовільними результатами електричних випробувань, значення концентрацій діагностичних розчинених газів H₂, CH₄, C₂H₆, ЗВГ в МТО, а також відношення CO₂/CO, зросли та перевищили встановлені граничні значення (табл. 3). При цьому значення концентрацій розчинених в МТО діагностичних газів CO₂, CO, навпаки, постійно зменшувалися і знаходилися в межах встановлених граничних значень [6] до моменту виявлення в цьому уводі дефектів на підставі електричних випробувань. У зв'язку з невеликим обсягом МТО в ОВУ (приблизно 215 кг) та високим вмістом розчиненого H₂ (табл. 3), можна припустити, що в процесі виникнення всередині ОВУ дефекту, пов'язаного з інтенсивним виділенням H₂, можливі хімічні реакції гідрування CO та CO₂ до CH₄. Це призводить до зниження значень концентрацій CO та CO₂ у МТО та підвищення значення концентрації розчиненого газу CH₄ за хімічними рівняннями [29]:



На можливість протікання хімічних процесів за рівняннями (1) та (2) вказує зростання концентрації H₂O від $W = 12,3$ г/т до $W = 15,4$ г/т в МТО (табл. 2).

Під впливом електричних розрядів на вуглеводні МТО основним продуктом реакції є H₂, у тому числі атомарний водень, який може не тільки приєднуватися по подвійним і потрійним вуглецевим зв'язкам у молекулах ненасичених вуглеводнів, а й викликати дисоціацію вуглеводнів за С-С-зв'язками. При цьому у великих концентраціях виділяється H₂ і може частково гідрувати C₂H₂ і C₂H₄ до C₂H₆ в об'ємі МТО [29]. Протікання хімічних реакцій (1) і (2) може бути пов'язане з генеруванням в об'ємі МТО: хімічно активних частинок водню в процесі виникнення електричних часткових розрядів; хімічно активних частинок вже розчиненого водню в МТО під впливом електричних часткових розрядів та іонізації цього розчиненого H₂ у процесі протікання електричних рідинних ударів, сонохімічних та плазмохімічних реакцій [20, 22].

В табл. 4 наведено результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОВУ при визначенні ЗВП і фуранових сполук.

Таблиця 4 – Результати аналізів за методами ГХ проб МТО із пошкодженого ОВУ при визначенні ЗВП і фуранових сполук

Δt ₄ , місяць	Компонент							
	O ₂ , ppm	N ₂ , ppm	ЗВП, ppm	2FOL, мг/кг	2ACF, мг/кг	5MEF, мг/кг	2FAL, мг/кг	ΣC _F , мг/кг
ГР	<10000	нв	<60000	1	1	1	1	1
120*	300	32000	32300	відс.	відс.	відс.	відс.	відс.
1	250	31500	31750	відс.	відс.	відс.	відс.	відс.
33	300	23900	24200	відс.	відс.	відс.	відс.	відс.
55	250	24000	24250	0,3	0,3	0,4	1,8**	2,8**

Примітки: ГР – граничний рівень; * – напрацювання часу після введення в експлуатацію ОВУ в ОСАТ, місяць; Δt₄ – напрацювання часу після попереднього аналізу проби МТО з ОВУ в ОСАТ, місяць; відс. – числове значення менше за поріг визначення вимірюваного показника відповідним ЗВТ; ** – значення, що не відповідають нормам та передбачають наявність дефектів [18]; нв – показник не визначається за вимогами [6].

Джерело: розроблено авторами

Результати визначення вмісту O₂, N₂, ЗВП, фуранових сполук у пробах МТО з ОВУ (табл. 4), показують, що: ОВУ був герметичним у процесі експлуатації та повітря в нього з навколишньої атмосфери не проникало; концентрація 2FAL та сума концентрацій фуранових сполук ΣC_F перевищують встановлені норми [18], що вказує на деструкцію ПОЕІ в ОВУ [18, 30].

Дослідження технічних станів ОСАТ та його пошкодженого ОВУ на підставі результатів ГХ аналізів проб МТО з них. У табл. 5 наведено допоміжні результати, отримані для діагностування ОСАТ та ОВУ на підставі результатів визначення за методами ГХ вмісту розчинених діагностичних газів у МТО (табл. 2 та табл. 3) та із урахуванням вимог [6].

Таблиця 5 – Допоміжні результати, отримані для діагностування ОСАТ та ОВУ на підставі результатів визначення за методами ГХ вмісту розчинених діагностичних газів в МТО

$\frac{H_2}{H_2}$	$\frac{CH_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{H_2}$	$\frac{C_2H_4}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	% CH ₄	% C ₂ H ₄	% C ₂ H ₂	Д, ppm
ОСАТ											
1	0,05	0,012	0,05	0	0,011	3,9	0,042	49	51	2*	54,2
ОВУ											
1	0,33	0,035	0	0	0	0,004	0	99,96	0,04	2*	14566

Примітки: H₂, CH₄, C₂H₄, C₂H₆, C₂H₂ – концентрація відповідного діагностичного газу МТО, ppm; * – умовне значення, прийняте по [6]; Д = (CH₄+C₂H₄+ C₂H₂), ppm; % CH₄ = 100·CH₄/Д, % відносний; % C₂H₄ = 100·C₂H₄/Д, % відносний; % C₂H₂ = 100·C₂H₂/Д, % відносний [6]

Джерело: адаптовано із [6]

Результати дослідження ОСАТ. Визначення наявності дефекту «Табличним методом». З даних табл. 2, табл. 5 та з використанням відносин концентрацій розчинених в МТО діагностичних газів C₂H₂/C₂H₄, CH₄/H₂, C₂H₄/C₂H₆, відповідно до рекомендацій [6, 7] в ОСАТ визначено тип дефекту – «Електричні розряди низької енергії» [6, 7] і при значенні CO₂/CO = 16 температура в зоні дефекту менше 150 °С (табл. 2).

Визначення наявності дефекту «Графічними методами». На рисунку 1 показаний результат визначення наявності імовірного дефекту в ОСАТ методом «Графічного образу», який за своїм зовнішнім виглядом близький до графічного образу дефекту, наведеного в [6, 7]. У розрахунках використані відносини концентрацій розчинених діагностичних газів у МТО: H₂/H₂, CH₄/H₂, C₂H₆/H₂, C₂H₄/H₂, C₂H₂/H₂.

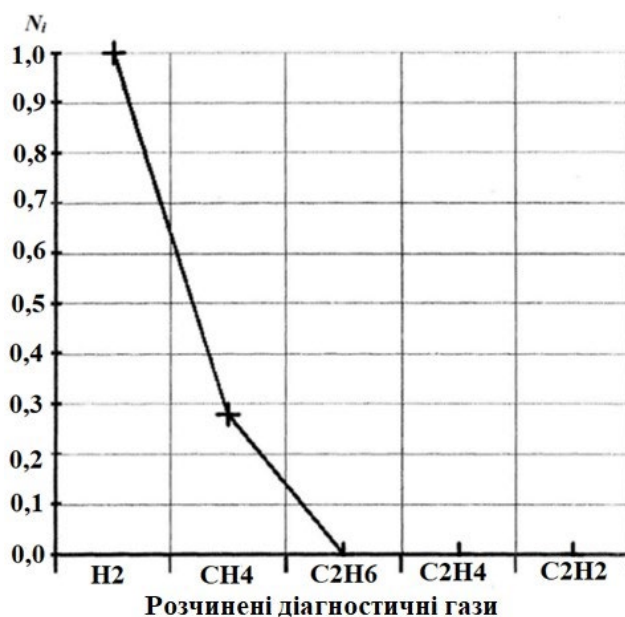


Рис. 1. Визначення наявності дефектів в ОСАТ графічним методом «Графічного образу»: N_i – значення відносин концентрацій i -х розчинених діагностичних газів C_i (H₂, CH₄, C₂H₆, C₂H₄, C₂H₂) до концентрації основного розчиненого в МТО газу C_o

Джерело: розроблено авторами

З рисунку 1 випливає: основний розчинений у МТО діагностичний газ C_o – водень (діагностичний газ з найбільшою концентрацією в МТО); виявлений дефект типу «Часткові електричні розряди» [6, 7]. На рисунку 2 показані результати визначення наявності дефекту «Графічними методами».

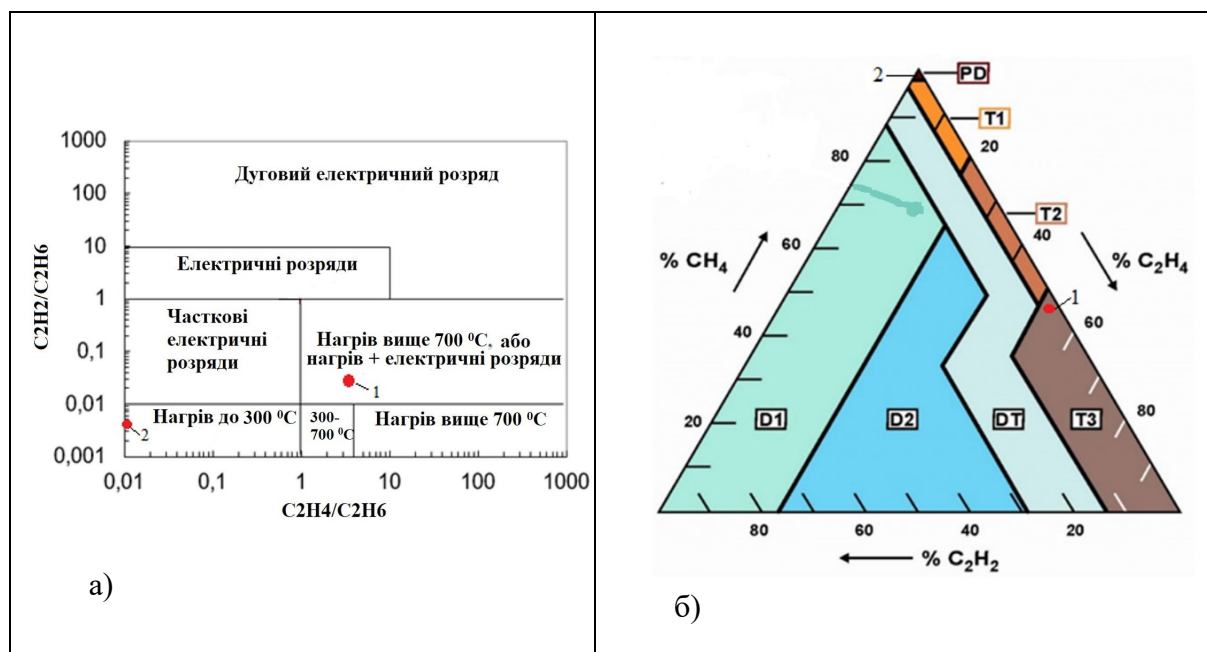


Рис. 2. Результати визначення наявності дефекту «Графічними методами»: а) метод «ЕТРА»: поз.1 – для ОСАТ; поз. 2 – для ОБУ; б) метод «Трикутник Дюваля»: поз. 1 – для ОСАТ; поз. 2 – для ОБУ

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 2: PD – часткові електричні розряди, T1 – перегрів менше ніж 300 °С, T2 – перегрів між 300 °С та 700 °С, T3 – перегрів понад 700 °С, D1 – часткові електричні розряди низької енергії (іскріння), D2 – часткові електричні розряди високої енергії (дуга), DT – змішання дефектів теплових та електричних типів. На рисунку 2-а (поз. 1) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту за методом «ETRA» для ОСАТ із використанням відносин концентрацій C_2H_2/C_2H_6 і C_2H_4/C_2H_6 (табл. 2, табл. 5). Ймовірний дефект типу «Нагрівання вище 700 °С» або «Нагрівання та часткові електричні розряди» [6, 7]). На рисунку 2-б (поз. 1) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту методом «Трикутник Дюваля» для дослідженого ОСАТ (дані з табл. 2 та табл. 5). Ймовірний дефект типу «Нагрівання вище 700 °С» [6, 7].

У зв'язку з тим, що за результатами досліджень електричних характеристик ОСАТ він визнаний справним і працездатним, наявність усередині цього ОСАТ дефектів електричного і теплового характерів може бути пов'язана з внутрішніми дефектами в його ОБУ. При використанні методів діагностування «ETRA» та «Трикутник Дюваля» в ОСАТ встановлено ймовірний дефект типу «Перегрів понад 700 °С». Такий дефект має супроводжуватися утворенням в МТО гетерогенних частинок вуглецю і розчиненого C_2H_2 [6, 7]. Однак у МТО не виявлено гетерогенних частинок вуглецю, а вміст розчиненого C_2H_2 в МТО в ОСАТ (табл. 2) має значення від 0,3 ppm до 0,7 ppm, що відповідає рівню технічного стану 2 (передбачається наявність дефекту) [6]. При цьому концентрації окремих фуранових сполук та сума їх концентрацій у МТО не перевищують встановлених нормованих значень порогів визначення ($C_{F,min} = 0,2$ мг/кг) для МТО [16]. Це свідчить про те, що: ПОЕІ в ОСАТ не зазнала деструкції [6, 18]; у разі діагностування ОСАТ, використання методів діагностування «ETRA» і «Трикутник Дюваля» вимагає уточнення граничних умов свого застосування.

Результати дослідження пошкодженого ОБУ. Визначення наявності дефекту за «Табличним методом». З даних табл. 3 і табл. 5 та з урахуванням значень відносин концентрацій розчинених діагностичних газів C_2H_2/C_2H_4 , CH_4/H_2 , C_2H_4/C_2H_6 , відповідно до рекомендацій [6] визначено: ймовірний тип дефекту в ОБУ – «Електричні розряди низької енергії» [6, 7]; при значенні $CO_2/CO = 122,8$ температура у зоні дефекту менше 150 °С; за значення $O_2/N_2 = 0,01$ (дані табл. 4) протікають окислювальні процеси високої інтенсивності в МТО [6, 7].

Визначення наявності дефекту «Графічними методами». Графічний образ ймовірного дефекту аналогічний наведеному на рисунку 1. Основний розчинений в МТО діагностичний газ – H_2 . З урахуванням значень відносин концентрацій розчинених у МТО діагностичних газів H_2/H_2 , CH_4/H_2 , C_2H_6/H_2 , C_2H_4/H_2 , C_2H_2/H_2 , ймовірний дефект – «Часткові електричні розряди» [6, 7].

На рисунку 2-а (поз. 2) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту за методом «ETRA» для дослідженого ОБУ. З урахуванням значень відносин розчинених у МТО діагностичних газів C_2H_2/C_2H_6 і C_2H_4/C_2H_6 (табл. 3 та 5) ймовірний дефект – «Нагрівання до 300 °С» [6, 7]). На рисунку 2-б (поз. 2) показаний результат визначення наявності ймовірного дефекту за методом «Трикутник Дюваля» для дослідженого ОБУ (дані з табл. 3 та 5). Ймовірний дефект – «Часткові електричні розряди» [6, 7].

На підставі отриманих результатів досліджень рекомендовано виконувати визначення вмісту фуранових сполук у пробах МТО з ОБУ із РОЕІ у випадках, якщо результати: електричних випробувань ОБУ не відповідають встановленим нормам [8]; фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних аналізів проб МТО з ОБУ не відповідають встановленим нормам [11]; аналізів за методами ГХ проб МТО вказують на перевищення концентрації хоча б для одного діагностичного розчиненого газу над встановленими нормами [6], навіть якщо вміст CO і CO_2 (табл. 3) відповідають встановленим нормам по [6].

Дослідження технічного стану пошкодженого ОВУ на підставі візуального огляду його зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів після його вилучення з ОСАТ. На рисунку 3 показані результати візуального огляду зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів пошкодженого ОВУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В» після його вилучення з ОСАТ.



Рис. 3. Результати візуального огляду та розбирання пошкодженого ОВУ типу ГМТПА-45-330/1000У1 фаза «В» після його вилучення з ОСАТ: а) сліди пошкодження електричного та термічного характеру на зовнішній поверхні ОВУ, що стикається з МТО всередині ОСАТ; б) дефекти електричного характеру у ПОЕІ; в) дефекти електричного та термічного характеру зі слідами утворення Х-воску в ПОЕІ; г) часткові електричні розряди та частки вугілля в ПОЕІ; д) дефекти електричного та термічного характеру у ПОЕІ

Джерело: розроблено авторами

На рисунку 3-а видно сліди пошкодження електричного та термічного характеру на зовнішній поверхні ОВУ, що стикається з МТО всередині ОСАТ. На рисунку 3-б видно дефекти електричного характеру в ПОЕІ. На рисунку 3-в видно дефекти електричного та термічного характеру зі слідами утворення Х-воску в ПОЕІ (наявність Х-воску призводить до: зростання електропровідності МТО [20, 31]; зниження електричної міцності МТО [21, 32]; локального нагрівання та прогресуючої деструкції МТО [22, 33]). На рисунку 3-г видно дефекти, пов'язані з частковими електричними розрядами та утворенням

частинок вугілля в ПОЕІ. На рисунку 3-д видно дефекти електричного та термічного характеру в електричній ізоляції.

В табл. 6 показано основний алгоритм дій при діагностуванні ОСАТ та його ОВУ з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб МТО з цього електрообладнання.

Таблиця 6 – Основний алгоритм дій при діагностуванні ОСАТ та його ОВУ з урахуванням результатів їх електричних випробувань та аналізів проб МТО із електрообладнання

№	Процедура	Результат
1.	Відбір проб МТО із ОСАТ згідно з графіком планового відбору проб МТО	1. Результати визначення фізико-хімічних, теплофізичних, електрофізичних властивостей проб МТО відповідають нормам 2. Результати ГХ аналізів вказують на наявність в ОСАТ дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «перегрів понад 700 °С»
2.	Вивід ОСАТ з роботи	Відключення від електричної мережі
3.	Електричні випробування ОСАТ	Результати електричних випробувань ОСАТ відповідають нормам
4.	Електричні випробування ОВУ в ОСАТ	Результати електричних випробувань ОВУ: а) типів ГМТПА-45-330/1000У1 (фази «А» і «С») та ГМТА-90-110/2000У1 (фази «А», «В» і «С») – відповідають встановленим нормам; б) типу ГМТПА-45-330/1000У1 (фаза «В») – не відповідають нормам
5.	Відбір проб МТО із пошкодженого ОВУ	1. Показник $tg\delta_{МТО}(70\text{ }^{\circ}\text{C}/90\text{ }^{\circ}\text{C})$ не відповідає нормам 2. Результати ГХ аналізів вказують на наявність в ОВУ дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «нагрівання до 300 °С», деградація ПОЕІ
6.	Вилучення пошкодженого ОВУ із ОСАТ і візуальний огляд зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів ОВУ	Результати візуального огляду: виявлені дефекти електричного і термічного характеру зі слідами Х-воску та часток твердого вуглецю в ПОЕІ
7.	Заміна пошкодженого ОВУ на дієздатний ОВУ аналогічного типу	Результати електричних випробувань ОВУ відповідають встановленим нормам
8.	Очищення та дегазація МТО у баку ОСАТ	Результати випробувань МТО відповідають нормам
9.	Введення в роботу ОСАТ	Результати випробувань ОСАТ відповідають нормам

Джерело: розроблено авторами

Дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених в МТО діагностичних компонентів CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , H_2O у присутності розчиненого H_2 . У табл. 7 представлені результати дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених в МТО марки ГК діагностичних компонентів CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , H_2O у присутності розчиненого H_2 . У процесі виконання дослідження середнє значення пробивної електричної напруги було на рівні $U = 65$ кВ.

Таблиця 7 – Результати дослідження впливу імпульсного електричного струму високої напруги на зміни концентрацій попередньо розчинених у МТО діагностичних компонентів CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , H_2O у присутності розчиненого H_2

Показник	Концентрація, $C_{i,m}$, % об.							W , г/г
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO_2	CO	H_2O
$N = 0$ (ГФ)	95,43	0,58	0,21	0,20	0,15	0,93	2,50	н
$N = 0$	5,0	0,25	0,25	0,34	0,35	1,00	0,30	9,0
$N = 36$	5,0	0,35	0,40	0,35	0,50	1,10	0,40	11,0
$N = 72$	5,0	0,45	0,41	0,38	0,65	0,95	0,33	12,8
$N = 108$	5,0	0,52	0,30	0,20	0,77	0,87	0,25	13,5
$N = 144$	5,0	0,70	0,25	0,15	0,88	0,65	0,18	15,0

Примітки: N – кількість електричних пробів; ГФ – концентрація діагностичного компоненту в газовій фазі над МТО; н – вимір не виконувався.

Джерело: розроблено авторами

З табл. 7 випливає, що у процесі дії імпульсного електричного струму високої напруги на МТО, що насичене воднем: концентрація розчиненого газу H_2 в МТО не змінюється і дорівнює розчинності цього газу в МТО; концентрації розчинених газів CH_4 та C_2H_6 безперервно підвищуються; концентрація розчиненого в МТО газу C_2H_2 підвищується до значення 0,41 % об. при $N = 72$, і далі зменшується до значення 0,25 % об. при $N = 144$. Аналогічний характер змін значень концентрацій стосується і розчинених в МТО газів C_2H_4 , CO_2 , CO , при цьому концентрація H_2O в МТО безперервно підвищується. Можна припустити, що для розчинених газів C_2H_2 , C_2H_4 , CO_2 , CO , виділення в об'ємі МТО водню, призводить до гідрування цих газів, зменшення їх концентрацій в МТО та підвищенню концентрації H_2O в МТО. Ці отримані дані можуть пояснити результати, що наведені в табл. 3.

Автори статті висловлюють подяку керівництву Служби діагностики, ізоляції, захисту від електричних перенапруг Південної електроенергетичної системи (м. Одеса) за надану інформацію про окремі результати випробувань ОСАТ та ОБУ.

Висновки. 1. Для досліджених ОСАТ та ОБУ застосовані методи діагностування: «табличний метод»; метод «графічного образу»; метод «ЕТРА»; метод «Трикутник Дюваля». Для ОСАТ встановлено види дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «перегрів понад 700 °С». Фуранові сполуки 2FOL, 2FAL, 2ACF, 5MEF в МТО відсутні, що вказує на відповідність стану ПОЕІ в ОСАТ встановленим нормам. Встановлено, що використання методів діагностування «ЕТРА» та «Трикутник Дюваля» потребує уточнення граничних умов свого застосування. Для пошкодженого ОБУ виявлено наступні види дефектів – «електричні розряди низької енергії», «часткові електричні розряди», «нагрівання до 300 °С». Сума концентрацій фуранових сполук $\Sigma C_F = 2,8$ мг/кг і перевищує встановлену норму, що вказує на деструкцію ПОЕІ. Рекомендовано додатково визначати вміст фуранових сполук у пробах МТО з ОБУ з ПОЕІ. При візуальному огляді зовнішньої поверхні та внутрішніх конструктивних елементів ОБУ після його вилучення з ОСАТ виявлено: сліди дефектів електричного та термічного характеру на зовнішній поверхні ОБУ, що стикається з МТО всередині ОСАТ; дефекти електричного характеру у ПОЕІ; дефекти електричного та термічного характеру зі слідами утворення Х-воску в ПОЕІ в ОБУ; дефекти електричного та термічного характеру в ПОЕІ в ОБУ; наявність часткових електричних розрядів та частинок вугілля в ПОЕІ. **2.** Для ОСАТ: фізико-хімічні, теплофізичні та електрофізичні властивості МТО (ρ , КЧ, ВРК, t_{cn} , W , U , $tg\delta_{MTO}$ при 90 °С, C_i) відповідають встановленим нормам; концентрації діагностичних розчинених газів H_2 , C_2H_4 , CO_2 , CO перевищують встановлені норми; рекомендовано визначати в МТО одночасно вміст фуранових сполук, присадки «Іонол». Для пошкодженого ОБУ з ПОЕІ: показник $tg\delta_{MTO}(70\text{ °С}/90\text{ °С}) = 2,96/5,1$ та показник ΣC_F

= 2,8 мг/кг не відповідають встановленим нормам. Для підвищення точності діагностування ОВУ рекомендовано виконувати одночасне визначення в МТО вмісту розчинених газів і фуранових сполук. Залежно від тривалості експлуатації ОСАТ та його ОВУ: а) для ОСАТ: концентрації розчинених газів H_2 , CO_2 , CO , C_2H_4 у МТО збільшуються, досягаючи своїх нормованих граничних значень; після заміни пошкодженого ОВУ на працездатний, концентрації діагностичних газів у МТО в ОСАТ відповідають встановленим нормам. Це вказує на відсутність внутрішніх дефектів в ОСАТ і вплив пошкодженого ОВУ на концентрації розчинених в МТО в ОСАТ діагностичних газів; б) для пошкодженого ОВУ: концентрації розчинених газів H_2 , CH_4 , C_2H_6 у МТО вище встановлених граничних значень; у разі виникнення дефекту в ОВУ в МТО можливе гідрування CO і CO_2 до CH_4 ; рекомендовано одночасне визначення властивостей проб МТО та вмісту в ньому діагностичних розчинених газів. У процесі дії імпульсного електричного струму високої напруги на МТО, що насичена воднем: а) концентрація розчиненого газу H_2 в МТО не змінюється і дорівнює розчинності цього газу в МТО; б) концентрації розчинених газів CH_4 та C_2H_6 безперервно підвищуються; в) ймовірно, що для розчинених газів C_2H_2 , C_2H_4 , CO_2 , CO виділення в об'ємі МТО водню, призводить до гідрування цих газів, зменшення їх концентрацій в МТО та підвищенню концентрації H_2O в МТО. **3.** При діагностуванні ОСАТ та його ОВУ встановлено алгоритм дій з урахуванням результатів електричних випробувань цього електрообладнання та аналізів проб МТО з нього. **4.** Отримані результати дають змогу підвищити достовірність діагностування ОСАТ та його ОВУ. Подальші перспективи досліджень полягають в удосконаленні елементів системи діагностування ОСАТ та ОВУ за результатами аналізів проб МТО з цього обладнання у процесах їх експлуатації.

Список використаних джерел

1. Сви, П. М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения / П. М. Сви. – Москва : Энергоатомиздат, 1992. – 240 с.
2. Сахно А. А. Температурная зависимость диэлектрических потерь бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа для диагностирования высоковольтных аппаратов в непрерывном режиме / А. А. Сахно, Л. С. Скрупская // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2017. – № 4(40). – С. 52-59.
3. IEC 60137:2003(E)-08. Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V. – Geneva, Switzerland. – 99 p.
4. Абрамов, В. Б. Приемальные та эксплуатационные испытания электроустановки / В. Б. Абрамов, В. О. Бржезицкий, О. Р. Проценко. – Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – 218 с.
5. Гобрей, Р. М. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 1 / Р. М. Гобрей, О. Є. Рубаненко, Г. І. Гримуд. – Київ : «НТУКЦ», 2008. – 528 с.
6. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ» : Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 99 с.
7. IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104 -2008). IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. – Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc. 3 Park Avenue, New York, NY 10016-5997. USA, 2019. – 98 p.
8. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. – Київ : ГРІФРЕ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 266 с.
9. ВБИЕ 672834.025 ИМ. Трансформаторы силовые. Инструкция по монтажу, пуску и эксплуатации. – Запорожье : Запорожский трансформаторный завод, 2001. – 38 с.
10. IEEE C57.12.90-2015/Cor 1-2017 (Corrigendum to IEEE Std C57.12.90-2015) – IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers

Corrigendum 1: Editorial and Technical Corrections: Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA, 2017. – 80 p.

11. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. – Київ : КВЦ: Міністерство палива та енергетики України, 2009. – 170 с.

12. СОУ-Н ЕЕ 46.302:2006. Підготовка та проведення хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі маслоснаповненого електрообладнання. Методичні вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2007. – 70 с.

13. IEC 60567:1992-07. Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases. – Geneva, Switzerland, 2005. – 80 p.

14. ASTM Standard D 4768-96. Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography. – ASTM International, 1996. – 3 p.

15. Зайцев, С. В. Разработка газохроматографического метода определения в энергетических маслах ионала и воды методом добавок / С. В. Зайцев, В. А. Кишнеvский, И. Д. Шуляк // Восточно-европейский журнал передовых технологий. – 2015. – № 2/6(74). – С. 21-28. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896

16. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-95:2014. Трансформаторні оливи. Методика визначення фуранових сполук : метод. вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2014. – 21 с.

17. IEC 61198:1993-09. Mineral insulating oils. Method for the determination of 2-furfural and related compounds. – Geneva, Switzerland, 1993. – 28 p.

18. СОУ-Н МЕВ 40.1-21677681-64:2012. Обстеження технічного стану і визначення залишкового ресурсу твердої ізоляції оливнонаповненого устаткування. Методика оцінювання залишкового ресурсу твердої ізоляції оливнонаповненого трансформатора : метод. вказівки. – Київ : ОЕП «ГРІФРЕ»: Міністерство палива та енергетики України, 2012. – 20 с.

19. Rogers, R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis / R. R. Rogers // IEEE Trans. on Electrical Insulation. – 1978. – Vol. 13, № 5. – P. 349-354. DOI: 10.1109/TEI.1978.298141

20. Славинский, А. З. Контроль электротехнического оборудования в эксплуатации и при ремонтах / А. З. Славинский. – Москва : Научтехлитиздат, 1999. – 110 с.

21. Липштейн, Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович. – Москва : Энергоатомиздат, 1983. – 296 с.

22. Технологія ремонту і експлуатації високовольтних уводів та їх конструктивні особливості / О. І. Гуменюк, О. Є. Рубаненко, О. М. Остапчук, В. Л. Таловер'я, Ю. О. Шаповалов. – Київ : «НТУКЦ», 2012. – 552 с.

23. Monitoring of Low Levels of Furfural in Power Transformer Oil with a Sensor System Based on a POF-MIP Platform / N. Cennamo, L. De Maria, G. D'Agostino, L. Zeni, M. Pesavento // Sensors. – 2015. – № 15(4). – P. 8499-8511. DOI:10.3390/s150408499

24. IEC 60628:1985. Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization / International Electrotechnical Commission. – Geneva, Switzerland, 1985. – 34 p.

25. Improvement of gas monitoring methods in water of the hydrogen-water cooling system of NPP'S turbine generator / S. Zaitsev, A. Tykhomyrov, V. Chychenin, V. Kyshnevskiy // Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News. – 2021. – № 1(29). – P. 49-57. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-930012021233705>

26. IEC 60156:1995 Insulating liquids. Determination of the breakdown voltage at power frequency. Test methods. International Standard. – Geneva, Switzerland, 2018. – 37 p.

27. Thango, B. A. Assessment of Transformer Cellulose Insulation Life Expectancy Based on Oil Furan Analysis (Case Study: South African Transformers) / B. A. Thango, J. A. Jordaan, A. F. Nnachi // Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal. – 2021. – Vol. 6. No. 6. – P. 29-33. DOI: 10.25046/aj060605

28. Prediction of Transformers Conditions and Lifetime Using Furan Compounds Analysis / R. A. abd El-Aal, K. Helal, A. M. M. Hassan, S. S. Dessouky. // IEEE ACCESS. – 2019. – Vol. 7. – P.102264-102273. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931422
29. Clayden, J. Organic Chemistry / J. Clayden, N. Greeves, S. Warren – Oxford University Press, 2012. – 1234 p.
30. Approach for Furan Estimation in Transformer Oil / A. Abu-Siada; Sin P. Lai; Syed M. Islam. A Novel Fuzzy-Logic. // IEEE Transactions on power delivery. – 2012. – Vol. 27, No. 2, April. – P. 469-474. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2186986
31. Костенко М.А. Техника высоких напряжений / М.А. Костенко. – М.: «Высшая школа», 1973. – 528 с.
32. Partial Discharges Behaviors of Internal Void in the Oil-Paper Insulation and its Effect on the Material / W. Zhang, Z. Li, Guojian Ji, J.Guo, Y.Yang // Proceedings of the 2015 International conference on Applied Science and Engineering Innovation. Atlantis Press, 2015. – P.1159-1163. DOI: 10.2991/asei-15.2015.229
33. Thomas, P. Ageing studies on paper-oil to assess the condition of solid insulation used in power transformers / P. Thomas; A.K. Shukla. // 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics (2001 June 25-29, Eindhoven, the Netherlands). – Eindhoven, 2001. – P. 69-72. DOI: 10.1109/ICSD.2001.955515

References

1. Svi, P.M. (1992). *Methods and means of diagnostics of high voltage equipment*. Moscow: Energoatomizdat.
2. Sakhno, A., Skrupskaya, L. (2017). Temperature dependence of the dielectric loss factor of oil-impregnated condenser insulation for the diagnosis of high-voltage apparatus in the online mode. *Electromechanical and energy-saving systems*, 4(40), 52–59.
3. International Standard. (2003). *Insulated bushings for alternating voltages above 1000 V* (IEC 60137:2003(E)-08).
4. Abramov, V.B., Brzezytskyi, V.O., Protsenko O.R. (2015). *Acceptance and operational tests of electrical equipment*. Kyiv: NTUU «KPI».
5. Gobrey, R.M., Rubanenko, O.Ye., Grimud, G.I. (2008). *Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment in the conditions of installation, commissioning and operation. Part 1*. Kyiv: NTUKC.
6. GRIFRE. (2007). *Diagnosis of oil-filled transformer equipment based on the results of chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in insulating oil. Methodical instructions* (SOU-N EE 46.501: 2006). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
7. IEEE. (2019). *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. Transformers Committee of the IEEE Power and Energy Society: The Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA* (IEEE Std C57.104™-2019 (Revision of IEEE Std C57.104-2008)).
8. GRIFRE. (2007). *Norms of electrical equipment testing* (SOU-N EE 20.302:2007). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
9. Zaporozhye Transformer Plant. (2001). *Power transformers. Instructions for installation, start-up and operation* (VBIE 672834.025 IM).
10. IEEE. (2017). *IEEE Standard Test Code for Liquid-Immersed Distribution, Power, and Regulating Transformers Corrigendum 1: Editorial and Technical Corrections: Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA* (IEEE C57.12.90-2015/Cor 1-2017 (Corrigendum to IEEE Std C57.12.90-2015)).
11. KVITS. (2009). *Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment* (SOU-N EE 43.101:2009). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
12. GRIFRE. (2007). *Preparation and chromatographic analysis of free gases selected from the gas relay and gases dissolved in the insulating oil of oil-filled electrical equipment. Methodical instructions* (SOU-N EE 46.302:2006). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
13. International Standard. (1992). *Guide for the sampling of gases and of oil from oil-filled electrical equipment and the analysis of free and dissolved gases* (IEC publication 60567:1992-07).

14. ASTM International. (1996). *Standard Test Method for Analysis of 2,6-Ditertiary-Butyl Para-Cresol and 2,6-Ditertiary-Butyl Phenol in Insulating Liquids by Gas Chromatography* (ASTM Standard D 4768-96).
15. Zaitsev, S.V., Kishnevsky, V.A., Shulyak, I.D. (2015). Development of a gas chromatographic method for the determination of ionol and water in energy oils by the method of additives]. *Eastern European Journal of Advanced Technologies*, (2/6-74), 21–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896
16. GRIFRE. (2014). *Transformer oils. Methods of determination of furan compounds. Methodological guidelines* (SOU-N EE 40.1-21677681-95:2014). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
17. International Standard. (1993). *Mineral insulating oils. Method for the determination of 2-furfural and related compounds* (IEC 61198:1993-09).
18. GRIFRE. (2012). *Inspection of technical condition and determination of residual life of solid insulation of oil-filled equipment. Method of estimating the residual life of solid insulation of an oil-filled transformer. Methodical instructions* (SOU-N MEV 40.1-21677681-64:2012). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine.
19. Rogers, R.R. (1978). IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, 13(5), p. 349–354. DOI: 10.1109/TEI.1978.298141
20. Slavinsky, A.Z. (1999). *Control of electrical equipment in operation and during repairs*. Moscow: Nauchtehlitizdat.
21. Lipstein, R.A., Shakhnovich, M.I (1983). *Transformer oil*. Moscow: Energoatomizdat.
22. Humenyuk, O.I., Rubanenko, O.E., Ostapchuk, O.M., Taloverya, V.L., Shapovalov, Yu.O. (2012). *Technology of repair and operation of high-voltage inputs and their design features*. Kyiv: Scientific-Technical Educational and Consultative Center».
23. Cennamo, N., De Maria, L., D'Agostino, G., Zeni, L., Pesavento, M. (2015). Monitoring of Low Levels of Furfural in Power Transformer Oil with a Sensor System Based on a POF-MIP Platform. *Sensors*, 15(4), p. 8499–8511. DOI:10.3390/s150408499
24. International Standard. (1985). *Gassing of insulating liquids under electrical stress and ionization* (IEC 60628:1985).
25. Zaitsev, S., Tykhomyrov, A., Chychenin V., Kyshnevskiy V. (2021). Improvement of gas monitoring methods in water of the hydrogen-water cooling system of NPP'S turbine generator. *Water and Water Purification Technologies. Scientific and Technical News*, 1(29), 49–57. DOI: <https://doi.org/10.20535/2218-930012021233705>
26. International Standard. (2018). *Insulating liquids. Determination of the breakdown voltage at power frequency. Test methods* (IEC 60156:1995).
27. Bonginkosi, A. T., Jacobus, A. J., Agha, F. N. (2021). Assessment of Transformer Cellulose Insulation Life Expectancy Based on Oil Furan Analysis (Case Study: South African Transformers). *Advances in Science, Technology and Engineering Systems Journal*, 6(6), 29–33. DOI: 10.25046/aj060605
28. El-Aal, R.A. abd, Helal, K., Hassan, A. M.M., Dessouky, S.S. (2019). Prediction of Transformers Conditions and Lifetime Using Furan Compounds Analysis. *IEEE ACCESS*, 7, p.102264–102273. DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2931422
29. Clayden, J., Greeves, N., Warren, S. (2012). *Organic Chemistry*. Oxford University Press, 2nd edition.
30. Abu-Siada, A., Lai, S. P., Islam, S. M. A Novel Fuzzy-Logic. (2012). Approach for Furan Estimation in Transformer Oil. *IEEE Transactions on power delivery*, 27(2), 469–474. DOI: 10.1109/TPWRD.2012.2186986
31. Kostenko, M.A. (1973). *High voltage technique*. Moscow: Vysshaya Shkola.
32. Zhang, W., Li, Z., Ji, G., Guo, J., Yang, Y. (2015). Partial Discharges Behaviors of Internal Void in the Oil-Paper Insulation and its Effect on the Material. Proceedings of the 2015 International conference on Applied Science and Engineering Innovation (P. 1159–1163). Atlantis Press. DOI: 10.2991/asei-15.2015.229

33. Thomas, P, Shukla, A.K. (2001). Ageing studies on paper-oil to assess the condition of solid insulation used in power transformers. *In 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics, June 25-29* (P. 69–72). Eindhoven, the Netherlands. DOI: 10.1109/ICSD.2001.955515

Отримано 11.08.2023

UDC: 621.314.222.6:621.319.48:621.311:621.89:662.753

Serhii Zaitsev¹, Valentin Tikhenko²

¹PhD in Technical Sciences, engineer of the Department of Nuclear Power Plants
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: sjavidet@ukr.net **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0002-1166-3243>

²Doctor of Technical Sciences, Professor, head of the Department of digital technologies in engineering
Odesa Polytechnic National University, (Odesa, Ukraine)

E-mail: vntikhenko@gmail.com **ORCID:** <https://orcid.org/0000-0003-2804-2838>

IMPROVEMENT OF METHODS OF DIAGNOSING A AUTOTRANSFORMER WITH AN EXTERNAL AND INTERNAL DEFECT IN THE HIGH-VOLTAGE BUSHING

Diagnostics of oil-filled high-voltage electrical equipment allows to solve the tasks of monitoring the technical condition, finding the location and determining the causes of the malfunction, forecasting the technical condition of such equipment on the basis of appropriate diagnostic support. Typical internal defects in oil-filled power high-voltage electrical transformers (autotransformers) occur in such functional systems as insulating, electromagnetic, current-conducting. There is a need for continuous improvement of methods for determining and identifying internal defects in oil-filled power high-voltage transformers (autotransformers). The main purpose of the article is to improve the reliability of the diagnostic results of olive-filled power high-voltage electrical autotransformers with external and internal defects in their olive-filled high-voltage bushings with paper-oil electrical insulation, which are in contact with transformer oil inside such autotransformers, taking into account the results of their electrical tests and analyzes of samples of mineral transformer oil from electrical equipment. Research subjects: autotransformer type ATDCTN-200000/330/110/10; oil-filled high-voltage bushings of types GMTPA-45-330/1000U1 and GMTA-90-110/2000U1 with paper-oil electrical insulation; mineral transformer oils of the GK brand; diagnostic gases dissolved in these oils (H_2 , CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CO_2 , CO , O_2 , N_2), additive "Ionol", furan compounds (2-furyl alcohol, 2-furfural, 2-acetylfuran, 5-methyl-2-furfural), H_2O . The following diagnostic methods are used for the investigated autotransformers and bushings: electrical measurements; "table method"; the method of "graphic images of defects"; "ETRA" method; Duval's Triangle method. Defined:

a) indicators of electrical characteristics for an oil-filled power autotransformer and oil-filled high-voltage bushing, and for mineral transformer oils, the indicators are breakdown voltage; the flash point of steam of transformer oils in an open crucible; acid number; water-soluble acids; tangent of the dielectric loss angle; density; the content of water, dissolved diagnostic gases, "Ionol" additives, furanic compounds; b) the effect of a pulsed electric current of high voltage on changes in the concentrations of such diagnostic gases and H_2O pre-dissolved in mineral transformer oil in the presence of dissolved H_2 ; c) types of defects in the autotransformer and its bushing. The obtained results will increase the reliability of the diagnostic results of an oil-filled power autotransformer with an external and internal defect in an oil-filled high-voltage bushing with paper-olive electrical insulation.

Keywords: electrical equipment; transformer oil; electrical transformer; dissolved gases; additives "Ionol"; furan compounds; chromatography.

Fig.: 7. *Table:* 3. *References:* 33.