

DOI: 10.31319/2519-2884.43.2023.11

УДК 621.3:621.3.06:621.311:621.316.933.5:543.544

**Зайцев С.В.**, к.т.н., інженер, ORCID: 0000-0002-1166-3243, e-mail: sdjavdet@ukr.net

**Кишневський В.П.**, д.т.н., професор, ORCID: 0000-0003-1780-2969,

e-mail: kishnevskiy@op.edu.ua

Національний університет «Одеська політехніка», м. Одеса

**Zaitsev Serhii**, Candidate of technical sciences, engineer of the Department of Atomic Power Plants

**Kishnevsky Victor**, Doctor of technical sciences, professor of the Department of Atomic Power Plants

Odessa National Polytechnic University, Odessa

### УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДУ ДІАГНОСТУВАННЯ ВИСОКОВОЛЬТНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ НАПРУГИ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ ХРОМАТОГРАФІЧНИХ АНАЛІЗІВ ТРАНСФОРМАТОРНИХ ОЛИВ

*Актуальність роботи зумовлена необхідністю удосконалення методів діагностування високовольтних оливонаповнених трансформаторів напруги з паперово-оливою електричною ізоляцією, що дозволяє вирішувати завдання контролю технічного стану, пошуку місця та визначення причин відмови (несправності), прогнозування технічного стану цього обладнання на основі відповідного діагностичного забезпечення. Для діагностування цього обладнання за результатами газохроматографічних аналізів проб трансформаторних олиव із подальшим визначенням імовірності наявності дефектів в цьому обладнанні, запропоновано застосовувати такі методи, як: «Граничний рівень концентрацій», «Табличний метод», метод «Графічних образів дефектів», «метод ETRA», «Трикутник Дюваля», «Візуальний огляд після розбирання високовольтних оливонаповнених трансформаторів напруги». Перспектива практичного застосування результатів роботи полягає в забезпеченні надійності експлуатації високовольтних оливонаповнених трансформаторів напруги за рахунок удосконалення методу їх діагностування за результатами аналізів проб мінеральних трансформаторних олив із одночасним визначенням в них вмісту розчинених газів, присадки «Іонол», фуранових сполук за методами газової хроматографії.*

**Ключові слова:** трансформаторні оливи; газова хроматографія; розчинені гази; присадка «Іонол»; фуранові сполуки; діагностування.

*The relevance of the work is due to the need to improve methods for diagnosing high-voltage oil-filled voltage transformers with paper-oil electrical insulation, which allows solving the problems of monitoring the technical condition, finding the place and determining the causes of failure (malfunction), predicting the technical condition of this equipment on the basis of appropriate diagnostic software. To diagnose this equipment based on the results of gas chromatographic analyses of transformer oil samples with further determination of the probability of defects in this equipment, it is proposed to use such methods as: "Limit level of concentrations", "Tabular method", "Graphic images of defects", "ETRA method", "Duval triangle", "Visual inspection after disassembly of high-voltage oil-filled voltage transformers". The prospect of practical application of the results of the work is to ensure the reliability of operation of high-voltage oil-filled voltage transformers by improving the method of their diagnosis based on the results of analyses of samples of mineral transformer oils with simultaneous determination of the content of dissolved gases, the additive "Ionol", furan compounds by gas chromatography.*

**Keywords:** transformer oils; gas chromatography; dissolved gases; Ionol additive; furan compounds; diagnostics.

#### Постановка проблеми

Надійність сучасних систем виробництва, розподілу та споживання електроенергії значною мірою залежить від надійності оливонаповненого високовольтного електротехнічного обладнання. На даний час в електроенергетичних підприємствах України знаходяться в експлуатації високовольтні оливонаповнені трансформатори напруги (ВОН) із захистом від зволожен-

ня за допомогою осушувачів повітря, що контактує із мінеральною трансформаторною оливою (МТО) в цих ВОТН [1]. Ушкодження ВОТН класів напруги 110—330 кВ із паперово-оливою електричною ізоляцією (ПОЕІ), часто призводять до аварій та економічної шкоди в енергетичних системах [2]. Аварії, пов'язані з електричним пробоем електричної ізоляції ВОТН, є доволі частими в обладнанні об'єктів електроенергетики [3]. Вимоги до технічного обслуговування ВОТН з урахуванням їх поточного стану визначають необхідність удосконалення елементів систем технічного діагностування таких ВОТН [4]. Визначення технічного стану ВОТН 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 діагностування ВОТН 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.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Вимоги нормативного документу [6] не поширюються на ВОТН класів напруги 110—330 кВ, і в той же час, контроль такого обладнання за результатами газохроматографічних (ГХ) аналізів проб МТО із ВОТН може виконуватися за рішенням технічного керівництва підприємства [6, 7]. В роботі [8] показана необхідність ГХ аналізів проб МТО із ВОТН для визначення вмісту розчинених газів, та не визначені процедури діагностування для подальшого виявлення типів дефектів за результатами таких аналізів. В роботі [9] показано, як концентрації розчинених газів в МТО можна інтерпретувати для діагностування стану оливонаповненого електрообладнання в експлуатації та запропонувати майбутні дії. Цей документ поширюється на електрообладнання, заповнене мінеральною ізоляційною оливою та ізольоване целюлозним папером або твердою ізоляцією на основі пресованного картону. Інформація про конкретні типи обладнання, надається лише як орієнтовна інформація [9]. В роботі [10]: показана необхідність ГХ аналізів проб МТО із ВОТН класів напруги 110 кВ і вище для визначення вмісту розчинених газів за методами ГХ; установлені норми концентрацій цих газів в МТО (метод «Граничний рівень концентрацій»); в залежності від значень цих концентрацій, встановлено 1-й, 2-й та 3-й рівні технічного стану ВОТН; в залежності від рівню технічного стану можна виявити імовірність наявності дефектів в ВОТН, при цьому не показані процедури діагностування для подальшого виявлення типів дефектів за результатами ГХ аналізів проб МТО. В роботах [11, 12] показано результати розробки метода ГХ для визначення в пробах МТО вмісту присадки «Іонол» та фуранових сполук (2-фуриловий спирт (2FOL); 2-фурфурол (2FAL); 2-ацетилфуран (2ACF); 5-метил-2-фурфурол (5MEF) за методами додатку. Ці методи можуть бути застосовані і для аналізу проб МТО із ВОТН, аналогічно виконаними в роботі [13]. В роботах [13—15] наведено результати визначення вмісту розчинених газів в пробах МТО із ВОТН класу напруги 330 кВ. Основними дефектами у ВОТН із ПОЕІ є: часткові електричні розряди; електричні розряди малої енергії; електричні розряди великої енергії; нагрівання з температурою 300—700 °С; нагрівання з температурою вище ніж 700 °С [6, 9, 16]. Якщо вміст фуранових сполук в МТО більше ніж 1 мг/кг, це може свідчити про перегрівання ПОЕІ [6]. При цьому на виникнення та розвиток внутрішніх дефектів можуть впливати такі фактори, як: строк служби; електричне навантаження; пошкодження внутрішніх елементів ВОТН; режим роботи; зовнішні короткі електричні замикання; проникнення газів та води з навколишнього атмосферного повітря у ВОТН; технологічне оброблення МТО [6, 16]. Такі гази, як  $O_2$  та  $N_2$  можуть потрапляти в МТО в результаті прямого контакту з повітрям в негерметичному ВОТН скрізь адсорбційний осушувач повітря [6]. При цьому: інтенсивні окиснювальні процеси в МТО протікають з витраченням  $O_2$ , і якщо швидкість витрачення  $O_2$  вище від швидкості його дифузії в МТО з повітря, відношення концентрацій  $O_2/N_2$  зменшується, і коли його значення досягає величини 0,2 і менше, у негерметичному обладнанні можна діагностувати окислювальні процеси аномально високої інтенсивності; місцеве підвищення температури в МТО вище ніж 140 °С може розглядатися як межа небезпечного стану [6]. Методами ГХ визначають в МТО вміст таких розчинених діагностичних компонентів, як: розчинені гази [17, 18]; присадка «Іонол» [12, 19]; фуранові сполуки [20, 21]. Діагностування ВОТН з ПОЕІ за результа-

тами ГХ аналізів проб МТО може бути виконано при визначенні в МТО вмісту розчинених газів [6, 16], присадки «Іонол» [22], фуранових сполук [6, 23] із подальшим використанням відповідних діагностичних моделей [6]. Діагностичні моделі, засновані на результатах дослідження у пробах МТО вмісту розчинених газів, можуть дозволити визначати у ВОТН з ПОЕІ: дефекти термічного та/або електричного характеру [24]; можливу присутність в МТО Х-воску, окислювальне старіння МТО; піроліз та карбонізацію МТО; накопичення частинок вуглецю в МТО [6]. При цьому можна використовувати: результати визначення поточних концентрацій розчинених газів у МТО; методи «граничних рівнів концентрацій», «відносин концентрацій характерних газів», у тому числі «табличний метод», «метод графічних образів дефектів» [6, 16]. Фуранові сполуки утворюються при деградації ПОЕІ у ВОТН під впливом електричних і теплових полів у середовищі МТО і є нестійкими речовинами та швидко розкладаються під дією температури в МТО [25]. Найбільш стійкою фурановою сполукою є 2FAL, значення концентрацій якої використовують для оцінювання технічного стану ПОЕІ [23].

#### Формулювання мети дослідження

Метою роботи є забезпечення надійності експлуатації ВОТН за рахунок удосконалення методу їх діагностування за результатами ГХ аналізів проб МТО. Відповідно до поставленої мети дослідження мають бути вирішені такі завдання:

1. Визначити в пробах МТО із ВОТН типів НКФ-110, НКФ-220, НКФ-330 вміст таких розчинених діагностичних компонентів, як: гази  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ; присадка «Іонол»; фуранові сполуки 2FOL, 2FAL, 2ACF, 5MEF та сума їх концентрацій (діагностичні компоненти).

2. Удосконалити основні процедури діагностування ВОТН за результатами аналізів проб МТО із визначенням в них вмісту розчинених діагностичних компонентів.

#### Виклад основного матеріалу

Об'єкт досліджень: методи діагностування ВОТН за результатами аналізів методами ГХ проб МТО із визначенням в них вмісту розчинених діагностичних компонентів. Предмети досліджень: проби МТО (марка Т-750; марка Т-1500) із ВОТН типів НКФ-110, НКФ-220, НКФ-330; розчинені в МТО діагностичні компоненти. Газовий хроматограф «Кристал-2000М» використано для визначення в МТО вмісту: а)  $C_{i,m}$  (ppm)  $i$ -х розчинених газів [17, 18]; б) присадки «Іонол»  $C_i$ , (% маси) [19, 22]; в)  $C_F$  (мг/кг) розчинених фуранових сполук [20, 21]. Для діагностування досліджених ВОТН за результатами ГХ аналізів проб МТО застосовані методи: «Граничний рівень концентрацій», «Табличний метод», метод «Графічних образів дефектів», метод «ETRA (Electric Technology Research Association)», метод «Трикутник Дюваля», метод «Визначення окиснювальних процесів високої інтенсивності» [6, 9, 16]; метод «Візуального огляду після розбирання ВОТН» [4, 5].

В табл. 1 показано вміст присадки «Іонол» та фуранових сполук, розчинених в пробах МТО із ВОТН.

Таблиця 1. Вміст присадки «Іонол» та фуранових сполук, розчинених в пробах МТО із ВОТН

Поз. №1 НКФ-330 ф. А <sub>нб</sub> №10899 (1977*) $C_i=0,18\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №2 НКФ-330ф. В <sub>нб</sub> №1102095 (1974*) $C_i=0,15\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №3 НКФ-330ф. А <sub>нб</sub> №107651 (1972*) $C_i=0,13\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №4 НКФ-330 ф. В <sub>нб</sub> №1076508 (1972*) $C_i=0,14\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №5-1 НКФ-330 ф. А <sub>вб</sub> №9058 (1972*) $C_i=0,15\%$ мас $C_F=1,5$ мг/кг	Поз. №5-2 НКФ-330 ф. А <sub>сб</sub> №9058 (1972*) $C_i=0,15\%$ мас $C_F=1,8$ мг/кг
Поз. №5-3 НКФ-330 ф. В <sub>сб</sub> №890691 (1972*) $C_i=0,18\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №5-4 НКФ-330 ф. С <sub>вб</sub> №1096024 (1972*) $C_i=0,19\%$ мас $C_F=1,6$ мг/кг	Поз. №5-5 НКФ-330 ф. С <sub>сб</sub> №1096024 (1972*) $C_i=0,19\%$ мас $C_F=1,7$ мг/кг	Поз. №6-1 НКФ-330 ф. А <sub>вб</sub> №814934 (1972*) $C_i=0,15\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №6-2 НКФ-330 ф. А <sub>нб</sub> №814934 (1972*) $C_i=0,15\%$ мас $C_F=1,6$ мг/кг	Поз. №6-3 НКФ-330 ф. В <sub>вб</sub> №814935 (1972*) $C_i=0,15\%$ мас $C_F<1$ мг/кг

Продовження таблиці 1.

Поз. №6-4 НКФ-330 ф.В <sub>сб</sub> №814935 (1972*) $C_i=0,15\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №6-5 НКФ-330 ф.В <sub>нб</sub> №814935 (1972*) $C_i=0,16\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №6-6 НКФ-330 ф.С <sub>сб</sub> №5904 (1972*) $C_i=0,18\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №7 НКФ-110ф.С №7859 (1978*) $C_i=0,18\%$ мас $C_F=1,5$ мг/кг	Поз. №8-1 НКФ-330 ф.С <sub>вб</sub> №2868 (1981*) $C_i=0,19\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №8-2 НКФ-330 ф.С <sub>сб</sub> №2868 (1981*) $C_i=0,19\%$ мас $C_F<1$ мг/кг
Поз. №9-1 НКФ-110 ф.В №952817 (1986*) $C_i=0,21\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №9-2 НКФ-110 ф.С №931527 (1986*) $C_i=0,22\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №10-1 НКФ-330 ф.В <sub>вб</sub> №1096032 (1993*) $C_i=0,25\%$ мас $C_F=1,8$ мг/кг	Поз. №10-2 НКФ-330 ф.С <sub>вб</sub> №1096033 (1993*) $C_i=0,25\%$ мас $C_F=1,6$ мг/кг	Поз. №11 НКФ-220 ф.С <sub>вб</sub> №799930 (1963*) $C_i<0,05\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №12-1 НКФ-220 ф.А <sub>вб</sub> №813000 (1963*) $C_i<0,05\%$ мас $C_F<1$ мг/кг
Поз. №12-2 НКФ-220 ф.А <sub>нб</sub> №813000 (1963*) $C_i<0,05\%$ мас $C_F<1$ мг/кг	Поз. №12-3 НКФ-220 ф.В <sub>вб</sub> №813001 (1963*) $C_i<0,05\%$ мас $C_F$ , мг/кг	Поз. №13-1 НКФ-330 ф.А <sub>сб</sub> №9469 (1972*) $C_i=0,17\%$ мас $C_F=1,8$ мг/кг	Поз. №13-2 НКФ-330 ф.А <sub>нб</sub> №9469 (1972*) $C_i=0,17\%$ мас $C_F=1,9$ мг/кг	Поз. №13-3 НКФ-330 ф.С <sub>нб</sub> №9461 (1972*) $C_i=0,18\%$ мас $C_F=1,6$ мг/кг	Поз. №14-1 НКФ-330 ф.В <sub>вб</sub> №2877 (1981*) $C_i=0,19\%$ мас $C_F$ , мг/кг
Поз. №14-2 НКФ-330 ф.В <sub>сб</sub> №2877 (1981*) $C_i=0,19\%$ мас $C_F$ , мг/кг	Поз. №15-1 НКФ-330 ф.В <sub>сб</sub> №1102101 (1981*) $C_i=0,16\%$ мас $C_F$ , мг/кг	Поз. №15-2 НКФ-330 ф.В <sub>нб</sub> №1102101 (1981*) $C_i=0,16\%$ мас $C_F$ , мг/кг	Поз. №15-3 НКФ-330 ф.С <sub>вб</sub> №1102103 (1981*) $C_i=0,16\%$ мас $C_F$ , мг/кг	Поз. №15-4 НКФ-330 ф.С <sub>сб</sub> №1102103 (1981*) $C_i=0,16\%$ мас $C_F$ , мг/кг	Поз. №16 НКФ-330 ф.А <sub>вб</sub> №10881 (1994*) $C_i=0,25\%$ мас $C_F$ , мг/кг

**Примітки:** \* — рік виготовлення ВОТН ; вб, сб, нб — верхній, середній, нижній блок каскадного ВОТН, відповідно;  $C_i$  — концентрація присадки «Іонол» в МТО, % мас.;  $\Sigma C_F$  — сума концентрацій фуранових сполук в МТО, мг/кг.

З табл. 1 випливає, що: а) для всіх досліджених ВОТН, крім поз.11, поз.12-1, поз.12-2, поз.12-3, вміст присадки «Іонол»  $C_i$  в МТО відповідає встановленим нормам (більше ніж 0,1 % мас) [22]; б) для всіх досліджених ВОТН сума концентрацій фуранових сполук  $\Sigma C_F$  в МТО відповідає встановленим нормам (менше ніж нормоване значення 1 мг/кг), крім ВОТН поз. 5-1, поз. 5-2, поз. 5-4, поз. 5-5, поз. 6-2, поз. 7, поз. 10-1, поз. 10-2, поз. 13-1, поз. 13-2, поз. 13-3 (більше ніж нормоване значення 1 мг/кг) — це передбачає перегрівання ПОЕІ в ВОТН та знижує його надійність із подальшим можливим механічним руйнуванням [6].

В табл. 2 показано вміст розчинених газів в пробах МТО із ВОТН.

Таблиця 2. Вміст розчинених газів в пробах МТО із ВОТН

Поз.	Розчинені гази									
	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	
	Нормовані значення концентрацій розчинених газів, $C_n$ , ppm							% об.		
	P1	<200	<20	<10	<10	<0,5	<300	<1000	—	—
	P2	200400	20-40	10-20	10-20	0,5-1	300-900	1000-2000		
P3	>400-700	>40-80	>20-40	>20-40	>1-2	>900	>2000-3500			
Визначені концентрації розчинених газів, $C_{i,m}$ , ppm (% об. — для O <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> )										
1	12,3	10,6	8,7	13*	0	37,4	640	3	7	
2	0,7	1,5	1,3	11,5*	0	55	947	2	7	
3	25	1,7	1,4	12,6*	0	103	1140*	3	6	

Продовження таблиці 2.

4	2	1,4	1,7	16*	0	98	1190*	2	7,5
5-1	7	43*	84*	14*	0	380*	1700*	0,6	8,7
5-2	7	48*	97*	13*	0	320*	1300*	0,04	6,5
5-3	4	8,3	15*	4	0	125	1620*	0,2	7,5
5-4	11	58*	62*	12,4*	1,5*	315*	1470*	0,2	7
5-5	11	44*	35*	10*	0	410*	1690*	0,1	7,8
6-1	1	1,4	1,4	10,3*	0	62	1380*	2,8	7,4
6-2	3	12	4	24*	0	200	2740*	0,07	7,8
6-3	8	14	3,2	16*	0	250	1920*	0,06	7
6-4	6	17	7,3	14*	0	220	1560*	0,06	6,9
6-5	2	18	9,2	11*	0	200	1470*	0,06	7
6-6	6	21*	30*	9	0	190	1440*	0,08	7
7	290*	5,3	5	42*	11,9*	195	15700*	0,08	8
8-1	5	1,1	1	10*	0	140	1390*	0,06	7,8
8-2	1	1,2	0,5	11*	0	150	1390*	0,09	6,8
9-1	1	1,6	2,4	6,3	3,7*	23	1320*	0,08	2,5
9-2	1	1,6	1,3	10*	0,92*	49	2210*	2,5	6,6
10-1	63	3,4	4,2	28,4*	0	145	5760*	2,5	7,4
10-2	52	5,9	6,5	24,3*	0	263*	6970*	1,6	8
11	1,3	4,2	3,4	14*	0	33	1590*	3	7
12-1	3	1,5	1	13*	0	72	850	0,2	6
12-2	2	1,5	2	16*	0	35	1060*	0,3	6
12-3	2	2	1,3	11*	0	32	1160*	0,5	7
13-1	235*	38*	24*	3,4	0	44	870	1	6
13-2	835*	116*	90*	4,2	0	86	962	1	7
13-3	645*	94*	75*	5	0	90	1070*	0,1	7
14-1	2	1,1	10*	1	0	64	2910*	0,5	6
14-2	4	1,5	0,5	11,2*	0	130	1530*	1	7
15-1	1	1	0	14*	0	70	1290*	0,8	6
15-2	6	1,5	0,6	12,3*	0	145	1600*	1,4	6,8
15-3	10	1,1	0,5	12*	0	125	1700*	1,2	7
15-4	1	3,5	1,5	15*	0	185	1450*	0,6	6
16	1000*	22**	8	8	0	90	3400*	0,07	6,4

**Примітки:** Поз. — номер ВОТН з Табл. 1; P1, P2, P3 — рівні стану 1, або 2, або 3, відповідно, для ВОТН [10]; \* — вміст не відповідає нормованим значенням концентрацій розчинених газів в МТО згідно до вимог діагностування досліджених ВОТН за результатами ГХ аналізів проб МТО із застосуванням методу «Граничний рівень концентрацій» [10].

Для діагностування ВОТН на підставі результатів ГХ визначення вмісту розчинених газів в пробах МТО застосовано такі допоміжні розрахункові показники, як: а)  $C_i/C_{i,max}$  (де:  $C_i$  — концентрація  $i$ -го розчиненого газу в МТО;  $C_{i,max}$  — вміст розчиненого газу, що має найвищу концентрацію в МТО);  $H_2/C_{i,max}$ ;  $CH_4/C_{i,max}$ ;  $C_2H_6/C_{i,max}$ ;  $C_2H_4/C_{i,max}$ ;  $C_2H_2/C_{i,max}$  (метод «Графічні образи дефектів»); б)  $C_2H_2/C_2H_6$ ;  $C_2H_4/C_2H_6$  (метод «ETRA»); в) %  $CH_4 = 100 \cdot CH_4/D$ , % відносний; %  $C_2H_4 = 100 \cdot C_2H_4/D$ , % відносний; %  $C_2H_2 = 100 \cdot C_2H_2/D$ , % відносний;  $D = (CH_4 + C_2H_4 + C_2H_2)$  (метод «Трикутник Дюваля»); г)  $O_2/N_2$  (метод «Визначення окиснювальних процесів високої інтенсивності»). В цих відношеннях:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$  — концентрації відповідно розчинених газів в МТО [6, 9, 16]. З табл. 2 та на підставі визначення допоміжних розрахункових показників, впливає, що: а) для всіх досліджених ВОТН, крім ВОТН поз. 1-4, поз. 6-1, поз. 9-2, поз. 10-1, відношення концентрацій  $O_2/N_2$  не відповідає встановленим нормам  $O_2/N_2 < 0,2$ , що вказує на протікання в МТО окиснювальних процесів

високої інтенсивності [6]; б) для ВОТН поз. 3, поз. 7, поз. 10-1, поз. 10-2, поз. 13-1, поз. 13-2, поз. 13-3, поз. 16 основним розчиненим в МТО газом є  $H_2$ . При цьому: за методом «Графічний образ дефекту» імовірний дефект в ВОТН — «Часткові розряди» (рис. 1-а) [6]; в) для ВОТН поз. 5-5, поз. 6-4, поз. 6-5 основним розчиненим в МТО газом є  $CH_4$ . При цьому: за методом «Графічний образ дефекту» імовірний дефект в ВОТН — «Нагрівання низької температури» (рис. 1-б) [6]; г) Для ВОТН поз. 5-1, поз. 5-2, поз. 5-4, поз. 6-6: концентрації горючих газів  $CH_4$  та  $C_2H_6$  перевищують їх граничні значення в МТО, основний газ —  $C_2H_6$ , графічний образ дефекту згідно із [6] відсутній, за рекомендаціями [6] в ВОТН можна визначити імовірність наявності дефекту типу «Місцеве перегрівання в струмопровідних вузлах, що контактують з МТО»; д) для ВОТН поз. 5-3, поз. 14-1 основним розчиненим в МТО газом є  $C_2H_6$ . При цьому: за методом «Графічний образ дефекту» імовірний дефект в ВОТН — «Термічний дефект, температура 150-300 °С» [6]; є) для ВОТН поз. 1, поз. 2, поз. 4, поз. 6-1, поз. 6-2, поз. 6-3, поз. 8-1, поз. 8-2, поз. 9-1, поз. 9-2, поз. 11, поз. 12-1, поз. 12-2, поз. 12-3, поз. 14-2, поз. 15-2, поз. 15-3, поз. 15-4 основним розчиненим в МТО газом є  $C_2H_4$ . При цьому: за методом «Графічний образ дефекту» імовірний дефект в ВОТН — «Нагрівання, що переходять в розряди» (рис. 1-в або рис. 1-г) [6]. При застосуванні методів діагностування «ЕТРА» (рис. 1-д) та «Трикутник Дюваля» (рис. 1-є), для всіх досліджених ВОТН виявлено імовірні дефекти «Часткові розряди» та «Нагрівання до 300 °С» [6].

На рис. 1 показано результати визначення наявності імовірних дефектів в ВОТН за методами «Графічного образу дефекту» та «Візуального огляду після розбирання ВОТН».

На рис. 2 показано результати визначення наявності імовірних дефектів в ВОТН за методом «Візуального огляду після розбирання ВОТН».

На рис. 2 видно дефекти, пов'язані з частковими розрядами та деградацією ПОЕІ.

Удосконалений алгоритм дій при діагностуванні ВОТН. Додатково до вимог [10] можна рекомендувати наступне: 1. В пробах МТО із ВОТН необхідно одночасно визначати вміст таких компонентів, як: а)  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ; б) концентрації  $O_2$  та  $N_2$  в пробах МТО із ВОТН для подальшого розрахунку відношення  $O_2/N_2$  та виявлення імовірного дефекту типу «Окиснювальні процеси аномально високої інтенсивності»; в) вміст присадки «Іонол» для виявлення швидкості її деградації та визначення необхідності додавання присадки «Іонол» до МТО або заміни МТО в ВОТН із попереднім очищенням внутрішніх елементів ВОТН; г) суму концентрацій  $C_F$  фуранових сполук (2-фуриловий спирт; 2-фурфурол; 2-ацетилфуран; 5-метил-2-фурфурол) для виявлення імовірних дефектів, пов'язаних із деструкцією ПОЕІ в ВОТН. Можна припустити наступне: якщо показник  $\Sigma C_F$  перевищує значення 1 мг/кг, то можна передбачати перегрівання ПОЕІ в ВОТН, що знижує його надійність із подальшим можливим механічним руйнуванням. 2. Для діагностування ВОТН за результатами ГХ аналізів проб МТО із ВОТН, застосувати такі методи, як: «Граничний рівень концентрацій», «Табличний метод», метод «Графічних образів дефектів», «ЕТРА», «Трикутник Дюваля», «Візуальний огляд після розбирання ВОТН». Для виявлення небезпеки розвитку імовірних дефектів 2-го рівня стану ВОТН, можна застосувати метод визначення «Відносної швидкості зростання концентрацій розчинених газів».

### Висновки

Для забезпечення надійності експлуатації ВОТН за рахунок удосконалення методу їх діагностування за результатами ГХ аналізів проб МТО визначено в пробах МТО із ВОТН типів НКФ-110, НКФ-220, НКФ-330 класів напруги 110—330 кВ вміст таких розчинених діагностичних компонентів, як: гази  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ; присадка «Іонол»; фуранові сполуки 2FOL, 2FAL, 2ACF, 5MEF та сума їх концентрацій (діагностичні компоненти). Виявлено: перевищення вмісту розчинених газів в МТО по зрівнянню із відповідними нормованими значеннями, що вказує на імовірність в ВОТН таких типів дефектів, як «Часткові розряди», «Нагрівання низької температури», «Термічний дефект, температура 150—300 °С», «Місцеве перегрівання в струмопровідних вузлах, що контактують з МТО», «Нагрівання, що переходять в розряди», «Протікання в МТО окиснювальних процесів високої інтенсивності»; перевищення вмісту суми концентрацій  $\Sigma C_F$  фуранових сполук в МТО по зрівнянню із норма-

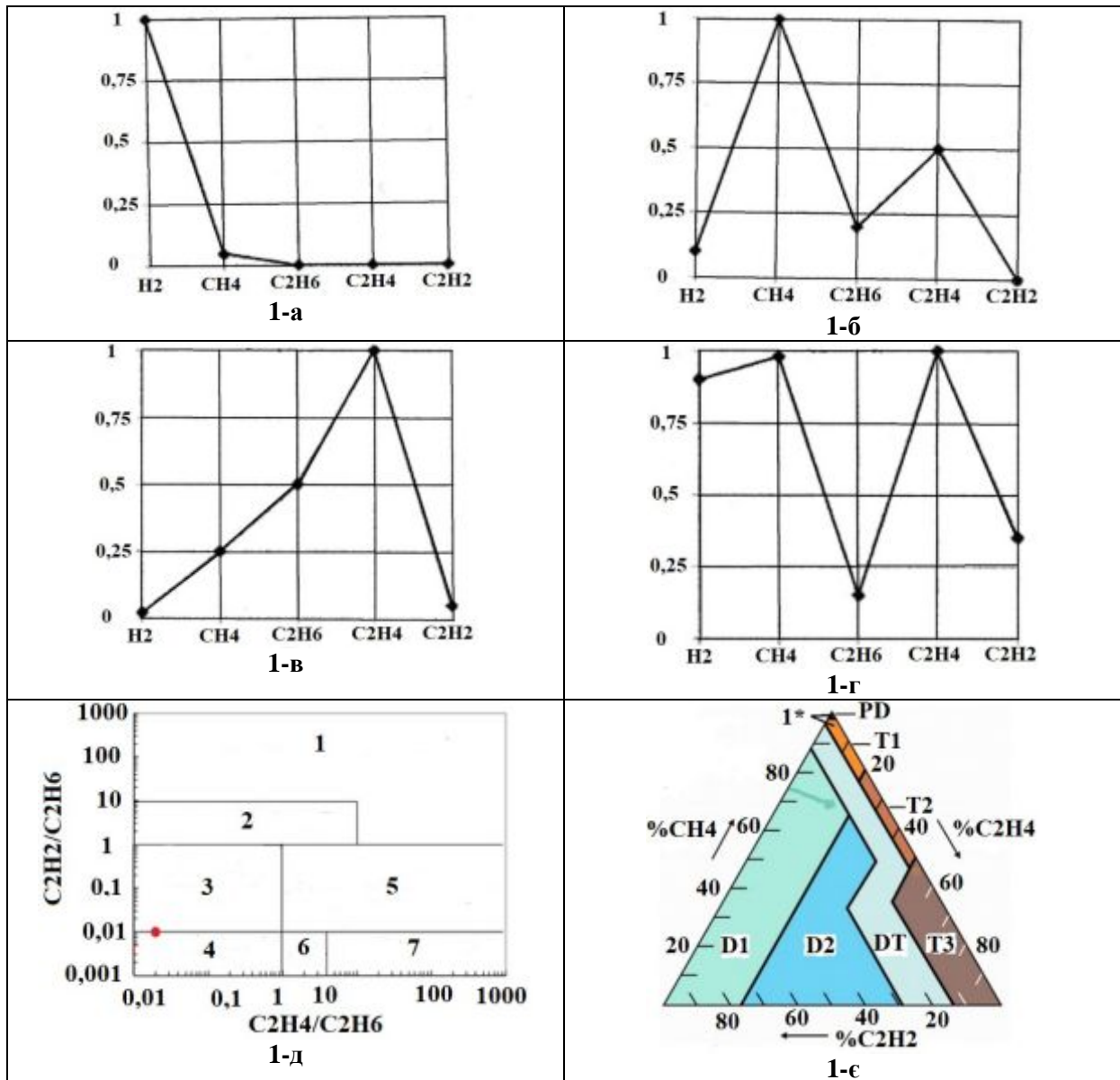


Рис. 1. Результати визначення наявності імовірних дефектів в ВОТН за методами «Графічного образу»: 1-а — дефект «Часткові розряди», основний газ Н<sub>2</sub>; 1-б — дефект «Нагрівання низької температури», основний газ СН<sub>4</sub>; 1-в та 1-г — дефект «Нагрівання, що переходять в розряди», основний газ С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>, вісь абсцис — розташування газів в послідовності Н<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>6</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>4</sub>, С<sub>2</sub>Н<sub>2</sub>, вісь ординат — відношення  $C_i/C_{i,max}$  (де:  $C_i$  — концентрація і-го розчиненого газу в МТО;  $C_{i,max}$  — вміст розчиненого газу, що має найвищу концентрацію в МТО); 1-д — дефекти «Часткові розряди» та «Нагрів до 300 °С» (метод «ЕТРА»), 1 — дефект «Дуговий електричний розряд», 2 — дефект «Електричні розряди», 3 — дефект «Часткові електричні розряди», 4 — дефект «Нагрів до 300 °С», 5 — дефект «Нагрів вище 700 °С», або «Нагрів + електричні розряди», 6 — дефект «Нагрів в інтервалі температур від 300 °С до 700 °С», 7 — дефект «Нагрів вище 700 °С»; 1-е — дефекти «Часткові розряди» та «Нагрівання до 300 °С» (метод «Трикутник Дюваля»), поз. 1\* — зона графіку, який характеризує імовірний дефект; PD — часткові розряди, T1 — перегрів менше ніж 300 °С, T2 — перегрів між 300 °С та 700 °С, T3 — перегрів понад 700 °С, D1 — часткові розряди низької енергії (іскріння), D2 — часткові розряди високої енергії (електрична дуга), DT — змішання теплових та електричних дефектів [6]



Рис. 2. Результати визначення наявності імовірних дефектів в ВОТН за методом «Візуального огляду після розбирання ВОТН».

ваним значенням вказує на перегрівання ПОЕІ в ВОТН, що знижує його надійність із подальшим можливим механічним руйнуванням. Удосконалений алгоритм дій при діагностуванні ВОТН за результатами ГХ аналізів проб МТО включає в себе процедури: а) контроль вмісту в МТО розчинених газів, фуранових сполук, присадки «Іонол» в пробах МТО із ВОТН; б) діагностування ВОТН із застосуванням методів: «Граничний рівень концентрацій», «Табличний метод», метод «Графічних образів дефектів», метод «ЕТРА», метод «Трикутник Дюваля», «Візуальний огляд після розбирання ВОТН». Подальші перспективи досліджень полягають в удосконаленні елементів системи діагностування ВОТН за результатами аналізів проб МТО з цього обладнання у процесах їх експлуатації.

#### Список використаної літератури

1. Анпилогов Н.Г., Бедерак Я.С. Методы контроля состояния и диагностирования силовых трансформаторов классом напряжения 35 кВ и выше. Харьков: Форт, 2010. 408 с.
2. Сви П.М. Методы и средства диагностики оборудования высокого напряжения. К.: Техніка, 1992. 240 с.
3. Сахно А.А., Скрупская Л.С. Температурная зависимость диэлектрических потерь бумажно-масляной изоляции конденсаторного типа для диагностирования высоковольтных аппаратов в непрерывном режиме. *Електромеханічні і енергозберігаючі системи*. Кременчук: КрНУ, 2017. № 4(40). С. 52–59.
4. Абрамов В.Б., Бржезицький В.О., Проценко О.Р. Приймальні та експлуатаційні випробування електроустаткування. Київ: НТУУ «КПІ», 2015. 218 с.
5. Гобрей Р.М., Рубаненко О.Є., Гримуд Г.І. Технічне діагностування, випробування та вимірювання електрообладнання в умовах монтажу, налагоджування і в експлуатації. Частина 1. 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. СОУ-Н ЕЕ 20.302:2007. Норми випробування електрообладнання. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», Міністерство палива та енергетики України, 2007. 266 с.
8. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-90:2013. Експлуатація вимірювальних трансформаторів. Наставна. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», Міністерство палива та енергетики України, 2014. 56 с.
9. IEC 60599:2022-05-25. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Geneva, Switzerland, 2022, 80 p.
10. Про підвищення рівня діагностики та експлуатації оливнонаповнених вимірювальних трансформаторів: Розпорядження № 39-р від 10.07.09 р., НЕК «Укрэнерго», м. Київ. 6 с. (Нормативний документ Мінпаливенерго України)
11. Зайцев С. В., Кишневикий В.А., Савич С.Л. Разработка методов газохроматографических определений содержания растворенных компонентов в энергетических маслах. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков: Технологический центр, 2014. № 6/6 (72). С. 34–42. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29389



12. Зайцев С.В., Кишневский В.А., Шуляк И.Д. Разработка газохроматографического метода определения в энергетических маслах ионах и воды методом добавок. *Восточно-Европейский журнал передовых технологий*. Харьков: Технологический центр, 2015. № 2/6 (74). С. 21–28. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896
13. Зайцев С.В., Кишневский В.А., Оборский Г.А., Прокопович И.В. Современные методы контроля энергетических масел и продуктов их деградации для обеспечения надежности эксплуатации маслонаполненного электрооборудования электрических станций и сетей: монография. Одесса: «Экология», 2019. 304 с.
14. Абрамов В.Б., Боярчуков Г. М. Отличительные особенности газообразования в трансформаторном масле герметичного и негерметичного высоковольтного оборудования. *Новини енергетики*. К.: «КВЦ», 2009. № 9. С. 17–32.
15. Боярчуков Г. М. Практические проблемы оценки состояния высоковольтного оборудования по содержанию газов в трансформаторном масле. *Новини енергетики*. К.: «КВЦ», 2010. № 10. С. 24–33.
16. 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.
17. СОУ-Н ЕЕ 46.302:2006. Підготовка та проведення хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі маслонаповненого електрообладнання. Методичні вказівки. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», Міністерство палива та енергетики України, 2007. 70 с.
18. 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.
19. 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.
20. СОУ-Н ЕЕ 40.1-21677681-95:2014. Трансформаторні оливи. Методика визначення фуранових сполук. Методичні вказівки. Вид. офіц. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», Міністерство палива та енергетики України, 2014. 21 с.
21. IEC 61198:1993-09. Mineral insulating oils. Method for the determination of 2-furfural and related compounds. Geneva, Switzerland, 1993, 28 p.
22. СОУ-Н ЕЕ 43.101:2009. Приймання, застосування та експлуатація трансформаторних масел. Норми оцінювання якості. Вид. офіц. Київ: «КВЦ», Міністерство палива та енергетики України, 2009. 170 с.
23. 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. Методичні вказівки. Вид. офіц. Київ: ОЕП «ГРІФРЕ», Міністерство палива та енергетики України, 2012. 20 с.
24. R.R. Rogers. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Trans. on Electrical Insulation*. 1978. Vol. 13, № 5. P.P. 349–354. DOI: 10.1109/TEI.1978.298141
25. Липштейн Р.А., Шахнович М.И. Трансформаторное масло. Київ: Техніка, 1983. 296 с.

## **IMPROVEMENT OF THE METHOD OF DIAGNOSTICS OF HIGH-VOLTAGE TRANSFORMERS VOLTAGE BASED ON THE RESULTS OF CHROMATOGRAPHIC ANALYSES OF TRANSFORMER OILS**

### **Abstract**

The relevance of the work is due to the need to improve methods for diagnosing high-voltage oil-filled voltage transformers with paper-oil electrical insulation, which makes it possible to solve the

problems of monitoring the technical condition, finding the place and determining the causes of failure (malfunction), and predicting the technical condition of this equipment on the basis of appropriate diagnostic software. The aim of the work is to ensure the reliability of operation of high-voltage oil-filled voltage transformers with paper-oil electrical insulation by improving the method of their diagnosis based on the results of analyses of samples of mineral transformer oils by gas chromatography. In accordance with the research objective, the following tasks were solved: 1. Determine the content of such dissolved diagnostic components in samples of mineral transformer oils from high-voltage oil-filled voltage transformers of NKF-110, NKF-220, NKF-330 types as gases  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ; additive "Ionol"; furan compounds (2-furyl alcohol; 2-furfural; 2-acetylfuran; 5-methyl-2-furfural) and the sum of their concentrations. 2. The basic procedures for diagnosing high-voltage oil-filled voltage transformers based on the results of analyses of mineral transformer oil samples with the determination of the content of dissolved diagnostic components in them were improved. For the diagnosis of high-voltage oil-filled voltage transformers based on the results of gas chromatographic analyses of samples of mineral transformer oils from this equipment, it is recommended to use the following methods: "Limit level of concentrations", "Tabular method", "Graphic images of defects", "ETRA", "Duval triangle", "Visual inspection after disassembly of high-voltage oil-filled voltage transformers". To determine the degree of danger of the development of the identified probable defects, the method of determining the "Relative growth rate of dissolved gas concentrations" can be used. The prospect of practical application of the results of the work is to ensure the reliability of operation of high-voltage oil-filled voltage transformers by improving the method of their diagnosis based on the results of analyses of samples of mineral transformer oils with simultaneous determination of the content of dissolved gases, the additive "Ionol", furan compounds by gas chromatography.

### References

- [1] Anpilogov N.G., Bederak Y.S. (2010). *Metody kontrolya sostoyaniya i diagnostirovaniya silovykh transformatorov klassom napryazheniya 35 kV i vyshe [Methods of condition control and diagnostics of power transformers of voltage class 35 kV and higher]*. Kharkov: Fort [in Ukraine].
- [2] Svi, P.M. (1992). *Metody i sredstva diagnostiki oborudovaniya vysokogo napryazheniya [Methods and means of diagnostics of high voltage equipment]*. Kyiv: Tehnika [in Russian].
- [3] Sakhno, A., Skrupskaya, L. (2017). Temperatur'naya zavisimost' dielektricheskikh poter' bumazhno-maslyanoy izolyatsii kondensatornogo tipa dlya diagnostirovaniya vysokovol'tnykh apparatov v nepreryvnom rezhime [Temperature dependence of the dielectric loss factor of oil-impregnated condenser insulation for the diagnosis of high-voltage apparatus in the online mode]. *Elektromekhanichni i enerhozberihayuchi systemy – Electromechanical and energy-saving systems*, 4(40), P.52–59. Kremenchuk: KrNU [in Ukraine].
- [4] Abramov, V.B., Brzytskyi, V.O., Protsenko O.R. (2015). *Prymal'ni ta ekspluatatsiyni vyprovuvannya elektrostatkuvannya [Acceptance and operational tests of electrical equipment]*. Kyiv: NTUU «KPI» [in Ukraine].
- [5] Gobrey, R.M., Rubanenko, O.Ye., Grimud, G.I. (2008). *Tekhnichne diahnostuvannya, vyprovuvannya ta vymiryuvannya elektroobladnannya v umovakh montazhu, nalahodzhuvannya i v ekspluatatsiyi. Chastyna 1. [Technical diagnostics, testing and measurement of electrical equipment in the conditions of installation, commissioning and operation. Part 1]*. Kyiv: NTUKC [in Ukraine].
- [6] GRIFRE. (2007). *Diahnostyka maslonapovnenoho transformatornoho obladnannya za rezul'tatamy khromatohrafichnoho analizu vil'nykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izolyatsynomu masli [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 [in Ukraine].
- [7] GRIFRE. (2007). *Normy vyprovuvannya elektroobladnannya [Norms of electrical equipment testing]* (SOU-N EE 20.302:2007). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine [in Ukraine].

- [8] GRIFRE. (2014). *Ekspluatatsiya vymiryuval'nykh transformatoriv. Nastanova [Operation of measuring transformers. Guidelines]*. (SOU-N EE 40.1-21677681-90:2013). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine [in Ukraine].
- [9] IEC 60599:2022-05-25. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Geneva, Switzerland, 2022, 80 p.
- [10] Pro pidvysychennya rivnya diahnostryky ta ekspluatatsiyi olyvonapovnenykh vymiryuval'nykh transformatoriv: Rozporyadzhennya № 39-r vid 10.07.09 r. [*On improving the level of diagnostics and operation of oil-filled measuring transformers: Order No. 39-p of 10.07.09*], NEC "Ukrenergo", Kyiv. (Regulatory document of the Ministry of Fuel and Energy of Ukraine) [in Ukraine].
- [11] Zaitsev, S.V., Kishnevskiy, V.A., Savich, S.L. (2014). Razrabotka metodov gazokhromatograficheskikh opredeleniy sodержaniy rastvorenykh komponentov v energeticheskikh maslakh [Development of methods of gas chromatographic determinations of dissolved components in energy oils]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – East-European Journal of Advanced Technologies*, 6/6 (72), P. 34–42. Kharkov: Technological Centre. DOI: 10.15587/1729-4061.2014.29389 [in Ukraine].
- [12] Zaitsev S.V., Kishnevskiy V.A., Shulyak I.D. (2015). Razrabotka gazokhromatograficheskogo metoda opredeleniya v energeticheskikh maslakh ionola i vody metodom dobavok [Development of gas chromatographic method for determination of ionol and water in energy oils by additive method]. *Vostochno-Yevropeyskiy zhurnal peredovykh tekhnologiy – East-European Journal of Advanced Technologies*, 2/6 (74). P. 21–28. Kharkov: Technological Centre. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.40896 [in Ukraine].
- [13] Zaitsev, S.V., Kishnevskiy, V.A., Oborsky, G.A., Prokopovich, I.V. (2019). *Modern methods of control of power oils and products of their degradation for maintenance of reliability of operation of oil-filled electrical equipment of electric power stations and networks: monograph*. Odessa: "Ecology" [in Ukraine].
- [14] Abramov, V.B., Boyarchukov, G.M. (2009). Otlichitel'nyye osobennosti gazoobrazovaniya v transformatornom masle germetichnogo i negermetichnogo vysokovol'tnogo oborudovaniya [Distinctive features of gas formation in transformer oil of hermetic and non-hermetic high-voltage equipment]. *Novyny enerhetyky – Energy news*, 9. P. 17–32. Kyiv: "KVITS" [in Ukraine].
- [15] Boyarchukov, G.M. (2010). Prakticheskiye problemy otsenki sostoyaniya vysokovol'tnogo oborudovaniya po sodержaniyu gazov v transformatornom masle [Practical Problems of High Voltage Equipment Condition Assessment by Gas Content in Transformer Oil]. *Novyny enerhetyky – Energy news*, 10. P. 24–33. Kyiv: "KVITS" [in Ukraine].
- [16] 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.
- [17] GRIFRE. (2007). *Pidhotovka ta provedennya khromatografichnoho analizu vil'nykh haziv, vidibranykh iz hazovoho rele, i haziv, rozchynenykh u izolyatsynomu masli maslonapovnenoho elektroobladnannya. Metodychni vказivky. [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 [in Ukraine].
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] GRIFRE. (2014). *Transformatorni olyvy. Metodyka vyznachennya furanovykh spoluk. Metodychni vказivky [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 [in Ukraine].

- [21] IEC 61198:1993-09. Mineral insulating oils. Method for the determination of 2-furfural and related compounds. Geneva, Switzerland, 1993, 28 p.
- [22] KVITS. (2009). *Pryymannya, zastosuvannya ta ekspluatatsiya transformatornykh masel. Normy otsinyuvannya yakosti. [Acceptance, application and operation of transformer oils. Norms of quality assessment]* (SOU-N EE 43.101:2009). Ministry of Fuel and Energy of Ukraine [in Ukraine].
- [23] GRIFRE. (2012). *Obstezhennya tekhnichnoho stanu i vyznachennya zalyshkovoho resursu tverdoyi izolyatsiyi olyvonapovnenoho ustatkuvannya. Metodyka otsinyuvannya zalyshkovoho resursu tverdoyi izolyatsiyi olyvonapovnenoho transformatora. Metodychni vказivky [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 [in Ukraine].
- [24] 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), 349–354. DOI: 10.1109/TEI.1978.298141
- [25] Lipstein, R.A., Shakhnovich, M.I (1983). *Transformer oil*. Kyiv: Tehnika [in Russian].

Надійшла до редколегії 03.11.23