

DOI: 10.20535/1810-0546.2018.6.151536

УДК 621.314

О.В. Шутенко<sup>1</sup>, В.Б. Абрамов<sup>2</sup>, І.С. Яковенко<sup>1\*</sup><sup>1</sup>Національний технічний університет “Харківський політехнічний інститут”, Харків, Україна<sup>2</sup>КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, Україна

## ПРАКТИЧНІ АСПЕКТИ РОЗПІЗНАВАННЯ ДЕФЕКТІВ ЕЛЕКТРИЧНОГО ТИПУ ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ РОЗЧИНЕНИХ У МАСЛІ ГАЗІВ

**Проблематика.** Розпізнавання типу дефектів у високовольтному маслonaповненому обладнанні, за результатами аналізу розчинених у маслі газів, із використанням значень критеріїв, які регламентовані чинним в Україні нормативним документом, не завжди дає змогу встановити правильний діагноз. З огляду на те, що постановка помилкового діагнозу може призвести до аварійного пошкодження обладнання, розглядаються шляхи підвищення достовірності розпізнавання типу дефекту.

**Мета дослідження.** Підвищення достовірності розпізнавання типу дефектів високовольтного маслonaповненого обладнання за результатами аналізу розчинених у маслі газів із використанням чинного в Україні нормативного документа.

**Методика реалізації.** Виконано порівняльний аналіз значень відношень газів і графічних образів для 31 різновиду дефектів електричного типу по 808 одиницях маслonaповненого обладнання. Наведено коротку характеристику та значення відношень газів і графічних образів для дефектів, розпізнавання яких викликає труднощі з використанням чинного в Україні нормативного документа.

**Результати дослідження.** Встановлено, що в умовах реальної експлуатації значення діагностичних критеріїв, які використовуються для розпізнавання типу дефектів, можуть істотно відрізнятися від значень, що регламентуються чинними як в Україні, так і за кордоном нормативними документами. Більше того, для деяких дефектів значення відношень газів одночасно відповідають різним дефектам, а еталонні графічні образи відсутні, що значно ускладнює процедуру їх розпізнавання. Для усунення цих недоліків запропоновано графічні образи і діапазони значень відношень газів, які дають змогу розпізнавати більшу кількість різновидів дефектів порівняно з чинним в Україні нормативним документом – 31 замість 6.

**Висновки.** Отримані і наведені в роботі діапазони значень відношень газів і графічні образи дефектів є діагностичною схемою, практичне використання якої дає можливість значно розширити діапазон дефектів, що розпізнаються за результатами аналізу розчинених у маслі газів, і тим самим підвищити експлуатаційну надійність високовольтного маслonaповненого обладнання.

**Ключові слова:** аналіз розчинених у маслі газів; відношення газів; графічні образи; тип дефекту; часткові розряди; іскрові розряди; повзучі розряди; дуга; X-воск; достовірність розпізнавання.

### Вступ

Розпізнавання типу дефекту, що прогнозується за результатами аналізу розчинених у маслі газів (АРГ), є найважливішим етапом при прийнятті рішення про можливість подальшої експлуатації маслonaповненого обладнання (МНО). Очевидно, що експлуатаційна надійність МНО багато в чому буде визначатися ступенем достовірності поставленого діагнозу. На сьогодні метод АРГ набув широкого застосування для діагностики МНО як в Україні, так і за кордоном, але при цьому мають місце суттєві відмінності в системах оцінки та визначення типу дефекту, які регламентовані у відомих методиках з інтерпретації результатів АРГ. Однак дослідження, виконані робочою групою СІГРЕ 15.01 [1], показали, що жоден із вико-

ристовуваних методів інтерпретації результатів АРГ не придатний для універсального застосування. Більше того, було встановлено, що різні методи інтерпретації результатів АРГ приводять до різних висновків. В таких умовах удосконалення методів розпізнавання типу дефектів є актуальним і практично важливим завданням, вирішення якого принципово не можливе без аналізу переваг і недоліків чинних міжнародних, національних та відомчих стандартів.

На сьогодні в Україні для інтерпретації результатів АРГ МНО використовуються нормовані значення та правила, що регламентуються чинним галузевим нормативним документом [2]. Цей документ мав бути переглянутий ще в 2012 р., але цього не сталося, і він до цього часу є чинним у своєму початковому вигляді. Згідно з його положеннями для розпізна-

\* corresponding author: i.c.jakovenko@gmail.com

вання типу дефектів регламентується використання як аналітичних методів, заснованих на відношеннях газів, так і графічних методів (графічні образи, трикутник Дюваля тощо). Як і в більшості відомих стандартів [3–5], для розпізнавання типу дефекту в [2] рекомендується використовувати значення трьох відношень: ацетилену до етилену ( $C_2H_2/C_2H_4$ ), метану до водню ( $CH_4/H_2$ ) і етилену до етану ( $C_2H_4/C_2H_6$ ). Значення цих відношень встановлені для справного стану обладнання і для семи різних дефектів. На додаток до відношень газів у [2] наведені еталонні графічні образи, що дають змогу розпізнавати 13 дефектів, у т.ч. і для дефектів, за яких електричні розряди супроводжуються перегрівом і навпаки. У той же час у відкритих літературних джерелах опубліковані результати, врахування яких дасть можливість удосконалити деякі окремі положення цього документа. Так, у роботах [6–8] встановлено суттєві якісні відмінності у вмісті газів для справного герметичного і негерметичного обладнання, що необхідно врахувати при регламентуванні відношень газів для справного стану обладнання. Аналогічні результати отримані й у [9]. Там показано, що значення відношень газів у справних трансформаторах негерметичного виконання більшою мірою відповідають термічним дефектам з температурами 300–700 °C і більше 700 °C ( $CH_4/H_2 > 1$  і  $C_2H_4/C_2H_6 > 1-4$ ). При цьому газами з максимальним вмістом є в основному  $C_2H_4$  і  $CH_4$ . Досить велика увага приділяється питанням використання апарату нечіткої логіки для інтерпретації результатів АРГ [10, 11], але при цьому для розробки системи нечіткого висновку використовуються критерії, регламентовані в [2], що накладає певні обмеження при розпізнаванні типу дефектів. Виконаний у роботі [12] аналіз графічних образів, побудованих за результатами АРГ обладнання з дефектами різного типу, дав змогу розробити та запропонувати метод отримання графічних областей [13], який враховує природний дрейф значень координат графічних образів дефектів, що обумовлений впливом експлуатаційних факторів.

Однак у [12, 13] не були розраховані та систематизовані відношення газів, що певним чином обмежує можливості безпосереднього використання наведених у цих роботах результатів. Крім того, незважаючи на значний обсяг публікацій, у відкритих літературних джерелах практично відсутній системний аналіз основних переваг і недоліків чинного в Україні нор-

мативного документа [2]. Зокрема, раніше не виконувалось зіставлення графічних образів з відношеннями газів, які враховують нормовані в цьому документі значення, що і стало одним із приводів для написання нашої статті. Слід також зазначити, що в процесі підготовки до її написання була значно доповнена та розширена база даних з результатами АРГ обладнання з дефектами різного типу, яка дала змогу проаналізувати більше графічних образів для дефектів електричного типу порівняно з [12], а також виконати аналіз відношень газів для цих дефектів.

### Постановка задачі

Основною метою досліджень є підвищення експлуатаційної надійності високовольтного електроенергетичного обладнання за рахунок удосконалення методів визначення типу дефектів за результатами аналізу розчинених у маслі газів.

### Метод вирішення

Як вихідні дані були використані експериментальні результати АРГ по 808 одиницях обладнання з дефектами електричного типу. На першому етапі досліджень результати АРГ були згруповані за типом виявленого дефекту. Для кожної одиниці обладнання для відповідного типу дефекту були розраховані значення відношень газів. Аби знизити похибки, розрахунок значень відношень газів виконувався тільки за умови, що значення концентрацій газів, для даного відношення, перевищували аналітичний поріг розпізнавання. Значення концентрацій газів, які відповідають аналітичному порогу розпізнавання, згідно з [2], наведені в табл. 1.

**Таблиця 1.** Концентрації газів аналітичного порога розпізнавання

Значення концентрацій газів, % об.				
$H_2$	$CH_4$	$C_2H_6$	$C_2H_4$	$C_2H_2$
0,005	0,0015	0,0015	0,0015	0,0003

Далі для кожного типу дефекту будувався графічний образ. Для цього спочатку за результатами АРГ серед усіх газів визначався той, який має найбільшу концентрацію. Потім розраховувалися значення відношень кожного газу до газу, що має найбільшу концентрацію. Далі

будувалися графіки образу дефекту, на якому по осі абсцис розміщувалися гази в такому порядку:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ , а по осі ординат відкладено обчислене відношення для кожного з цих газів. Отримані точки з'єднувалися лінією.

Розраховані значення відношень газів для кожного типу дефекту порівнювалися зі значеннями відношень, вказаними в табл. 2 і регламентованими в [2] для певного типу дефекту. А побудовані графічні образи порівнювалися з наведеними в [2] еталонними образами.

Таблиця 2. Значення відношень газів для дефектів електричного типу, які регламентуються СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006

№	Тип прогнозованого дефекту	$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
1	Нормальне старіння	*	0,1–1	<0,2
2	Часткові розряди	*	<0,1	<0,2
3	Розряди малої енергії	>1	0,1–0,5	>1
4	Розряди високої енергії	>1	0,1–1	>2
5	Розряди на поверхні й у товщині ізоляції (повзучий розряд)	<1	0,3–0,5	>5

\* Неважливо для будь-якого значення.

Таблиця 3. Розраховані значення відношень пар газів для дефектів різного типу.

№	Тип дефекту, обсяг вибірки	Значення відношень газів		
		$C_2H_2/C_2H_4$	$CH_4/H_2$	$C_2H_4/C_2H_6$
1	Ч.р.* з низькою щільністю енергії. $N = 82$	0,014–0,095	0,018–0,098	0,464–0,844
2	Ч.р. з низькою щільністю енергії. $N = 17$	–	0,03–0,07	–
3	Ч.р. з низькою щільністю енергії. $N = 25$	0,009–0,080	0,002–0,095	1,02–6,73
4	Ч.р. з низькою щільністю енергії. $N = 8$	–	12–20	0,2–0,75
5	Ч.р. з низькою щільністю енергії. $N = 4$	–	0,2–0,48	0,001–0,003
6	Ч.р. з високою щільністю енергії. $N = 5$	0,11–0,789	0,06–0,095	0,23–0,972
7	Ч.р. з високою щільністю енергії. $N = 6$	0,12–0,16	0,01–0,073	0,35–0,92
8	Ч.р. з високою щільністю енергії. $N = 76$	1–10,7	0,009–0,09	0,11–0,94
9	Ч.р. з високою щільністю енергії. $N = 3$	26–78	0,05–0,3	0,25–0,75
10	Ч.р. $N = 19$	–	0,108–0,227	–
11	Ч.р. $N = 23$	0,15–0,56	0,1–0,28	0,1–0,37
12	Ч.р. $N = 5$	0,17–0,56	0,14–0,60	0,21–0,63
13.	Ч.р. $N = 4$	0,8–1,1	0,1–0,41	0,24–0,69
14	Іскрові розряди. $N = 4$	0,005–0,05	0,021–0,095	4,0–16,0
15	Іскрові розряди. $N = 5$	0,13–0,86	0,021–0,093	4,2–7,8
16.	Іскрові розряди. $N = 26$	0,02–0,98	0,13–0,49	1,3–18,5
17	Іскрові розряди. $N = 57$	0,11–0,99	0,107–0,93	1,0–4,92
18	Іскрові розряди. $N = 40$	0,104–0,982	0,125–0,86	5,2–14,1
19	Розряди низької енергії. $N = 7$	1,8–6,7	0,05–0,08	1,0–1,26
20	Розряди низької енергії. $N = 15$	1,05–4,5	0,1–0,71	0,12–0,88
21	Розряди низької енергії. $N = 5$	1,1–9,9	0,92–0,98	0,06–0,23
22	Розряди низької енергії. $N = 15$	1,8–14,9	0,11–0,39	0,17–0,66
23	Розряди низької енергії. $N = 4$	1,33–8,47	0,12–0,47	0,54–1,0
24.	Розряди низької енергії. $N = 8$	1,34–3,23	0,78–0,922	0,49–0,79
25	Розряди низької енергії. $N = 29$	1,1–4,91	0,12–0,509	1,0–1,88
26	Розряди низької енергії. $N = 8$	1,78–4,33	0,56–0,854	1,0–1,765
27	Дуга низької енергії. $N = 72$	1,3–11,6	0,01–0,099	3,4–13,6
28	Дуга низької енергії. $N = 3$	2,8–10,6	0,05–0,086	2,75–15,2
29	Розряди високої енергії. $N = 116$	1,02–12,6	0,1–0,78	2,8–22,0
30	Розряди високої енергії. $N = 14$	1,2–92	0,147–0,66	7,8–104,4
31	Розряди високої енергії. $N = 104$	1,02–18,5	0,11–0,981	2,06–30,9

\* Ч.р. – часткові розряди.

Розраховані на підставі експериментальних результатів АРГ значення відношень газів для дефектів різного типу і обсяги вибіркового значень, для яких вони отримані за ознакою однаковості типу дефекту, наведені в табл. 3. Значення відношень наведені у вигляді діапазонів, що відповідають мінімальному і максимальному значенням відношень для даного дефекту. Для зручності аналізу графічні образи були пронумеровані наскрізною нумерацією, номер образу збігається з номером дефекту з табл. 3.

### Часткові розряди з низькою щільністю енергії

На відміну від [2], де відсутня градація часткових розрядів за рівнями енергії, в деяких стандартах (наприклад, у [5]) розрізняють часткові розряди з низькою і високою щільністю енергії.

Часткові розряди (ч.р.) з низькою щільністю енергії – це розряди в повітряних або газових порожнинах, що утворились унаслідок неповного просочування або зволоження ізоляції. Вважається, що при таких ч.р. газом із максимальним вмістом є  $H_2$ , супутнім газом –  $CH_4$ .

У чинному в Україні нормативному документі для розпізнавання ч.р. регламентовані числові значення тільки для двох відношень –  $CH_4/H_2$  і  $C_2H_4/C_2H_6$ , а відношення  $C_2H_2/C_2H_4$

є нехарактерним (див. табл. 2). При цьому значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6$ , як і в стандарті МЕК 60599, для ч.р. регламентовано на рівні не більше 0,2 (див. табл. 2). У той же час, як видно з табл. 3, значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6$ , отримане для обладнання з ч.р., перевищує значення 0,2. При цьому з 82 одиниць обладнання з ч.р., для яких газом із максимальним вмістом є  $H_2$ , значення концентрацій і  $C_2H_4$ , і  $C_2H_6$ , які перевищують аналітичний поріг розпізнавання (що дає змогу розрахувати значення цього відношення), виявлені тільки для 6 одиниць обладнання. І для всіх 6 випадків значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6$  перевищувало 0,2. У зв'язку з цим автори вважають, що значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6$  для ч.р. з низькою щільністю енергії підлягає корегуванню. Графічний образ для цих дефектів наведено на рис. 1 (№ 1) і збігається з еталонним, вказаним у [2].

У низці зарубіжних джерел наводяться результати АРГ обладнання з ч.р., для яких газом із максимальним вмістом є  $H_2$ , але вміст газів є таким, що графічні образи відрізняються від еталонного, що регламентовано в [2].

Для дефектів з групи № 2 (див. образ № 2 на рис. 1) характерним є більш високий вміст етану порівняно із вмістом метану й етилену. Оскільки в [2] значення відношення  $C_2H_6/CH_4$  не використовується, а значення відношень

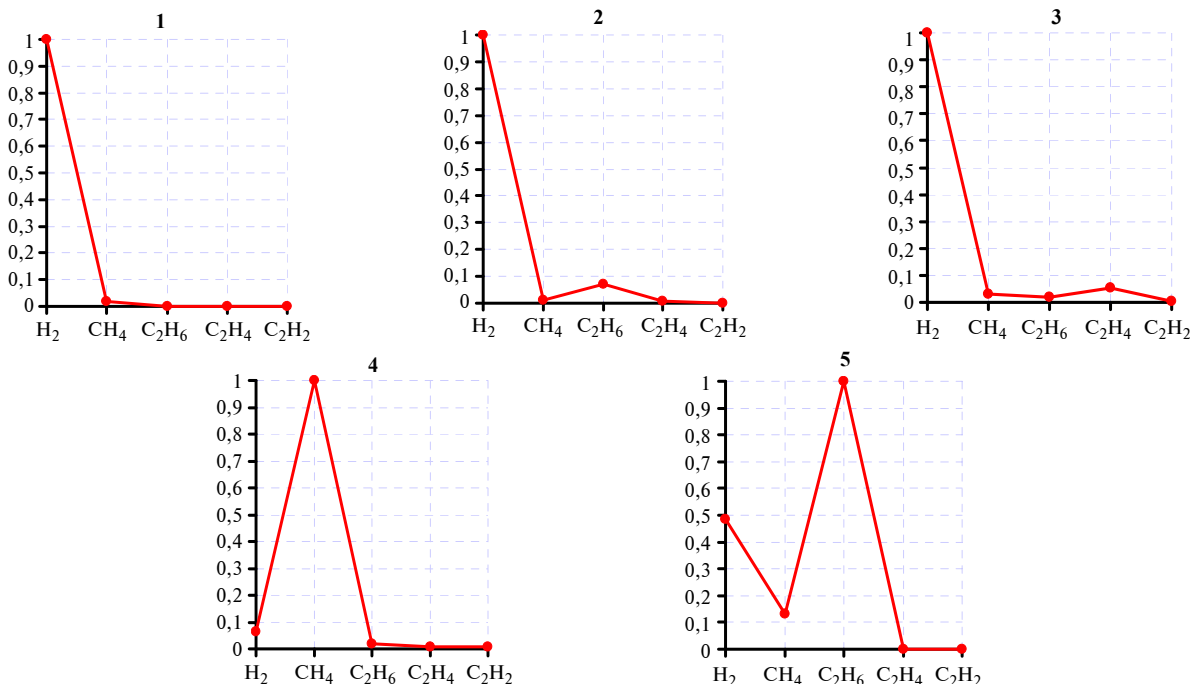


Рис. 1. Графічні образи, побудовані за результатами аналізу розчинених у маслі газів обладнання з частковими розрядами низької енергії

газів із табл. 3 відповідають ч.р., то побачити особливості вмісту газів для цього дефекту можливо тільки на основі аналізу графічних образів. Згідно з даними, наведеними в [14], подібний вміст газів відповідає ч.р. з низькою щільністю енергії (Low Energy Partial Discharges). У [15] наведені результати АРГ трансформатора напругою 132/11 кВ і потужністю 12,5 МВА, фірми “TELK”, 1973 року випуску, залитого маслом марки “Naphtha”. За результатами аналізу встановлено, що в трансформаторі мали місце ч.р., а також перегрів, що призвів до розкладання целюлози.

Істотні розбіжності при розпізнаванні типу дефекту виявлені для обладнання з результатами АРГ, у яких газом із максимальним змістом є  $H_2$ , але при цьому вміст етилену вищий, ніж вміст етану. Таким дефектам відповідає образ № 3 на рис. 1. У [16] такий дефект ідентифіковано як ч.р. і зволоження, а в роботі [17] – як перегрів у діапазоні температур 150–300 °С. У [18] подібний вміст газів пов'язано з розвитком коронного розряду в бульбашках повітря. В роботі [19] близькі за формою образи одержані для шунтуючих реакторів, а отриманий вміст газів пов'язується з розкладанням масла під дією ультразвукової кавітації. Принципово важливим є те, що в чинному в Україні нормативному документі відсутня комбінація відношень газів, що відповідають таким дефектам.

Слід зазначити, що при ч.р. максимальний вміст може мати не тільки водень. Так, у [18, 20] наведені результати АРГ обладнання з ч.р. або короною в маслі, для яких максимальний вміст має метан. Так, з табл. 3 (дефект № 4) значення відношення  $CH_4/H_2$  набагато перевищує одиницю, що, згідно з [2], характерно для термічних дефектів, а не для ч.р. Характерний образ для таких дефектів наведено на рис. 1, № 4. У праці [21] наведені результати АРГ об-

ладнання з ч.р., але при цьому газом із максимальним вмістом є етан, а значення відношення  $CH_4/H_2$  перевищує 0,1 (див. табл. 3, дефект № 5). Аналогічний вміст газів отримано в [22] для трансформатора струму ТФЗМ-110Б-У1, залитого маслом марки ГК, у якому виявлено відкладення Х-воску. Графічний образ, побудований за результатами АРГ обладнання, з такими дефектами наведено на рис. 1, № 5. Слід зазначити, що з п'яти графічних образів, наведених на рис. 1, тільки один відповідає регламентованому в [2] образу (див. ч.р. з низькою щільністю енергії № 1 на рис. 1).

### Часткові розряди з високою щільністю енергії

Згідно з [5], ч.р. з високою щільністю енергії призводять до залишення сліду або пробою твердої ізоляції, і для них значення відношення  $C_2H_2/C_2H_4$  знаходиться в межах 0,1–3, а значення інших відношень збігаються зі значеннями, регламентованими для ч.р. з низькою щільністю енергії. Розраховані значення відношень газів для ч.р. з високою щільністю енергії наведені в табл. 3 (№ 6–9). Незважаючи на те що для всіх дефектів значення відношень газів відповідають ч.р. з високою щільністю енергії, вміст газів і, як наслідок, графічні образи (див. рис. 2) істотно різняться.

Так, образи для дефектів № 6 і 8 схожі з образом № 1 на рис. 1, відмінність полягає у вмісті ацетилену. При цьому розпізнавання таких дефектів не є складним [18, 23]. Дефект № 7 з табл. 3 у [24, 25] також ідентифікований як ч.р. з високою щільністю енергії, незважаючи на те що в обладнанні з таким дефектом вміст етану перевищує вміст етилену і метану. Згідно з існуючими уявленнями про вміст газів у обладнанні з дефектами різного типу, викладеними в [2], максимальний вміст ацетилену

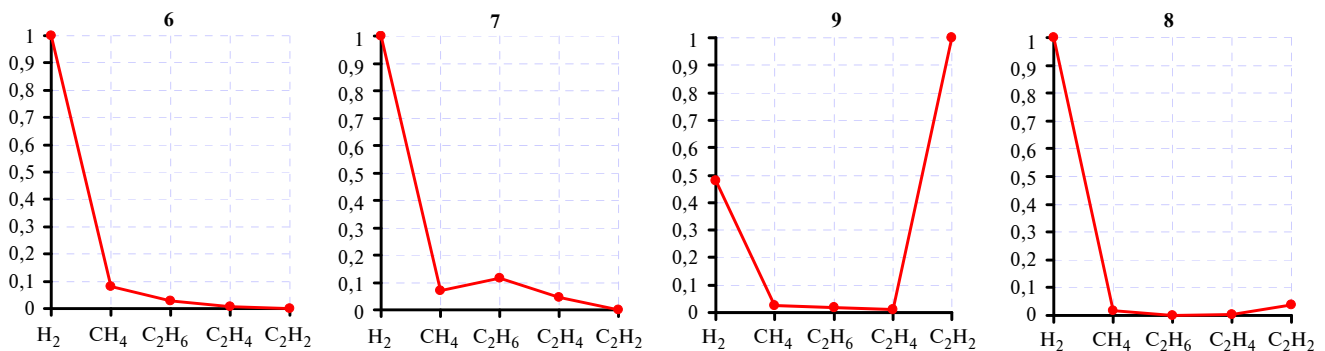


Рис. 2. Графічні образи, побудовані за результатами аналізу розчинених у маслі газів обладнання з частковими розрядами високої енергії

має місце тільки при розрядах високої енергії. Однак у деяких зарубіжних джерелах, наприклад у [26], наведені результати АРГ, у яких газом із максимальним вмістом є ацетилен, але при цьому, як видно з табл. 3 (дефект № 9), значення відношень  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  і  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6$  відповідають ч.р., а значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$  – розрядам високої енергії. В роботі [26] цей дефект ідентифіковано як розряди високої енергії, графічний образ для такого дефекту наведено на рис. 2, № 9. З чотирьох образів, наведених на рис. 2, у [2] не регламентовано жодного. Найбільш близьким до регламентованого в [2] образу є образ № 6 на рис. 2.

Однозначно встановити тип для дефектів № 10–13 за відношеннями газів із табл. 3 досить складно, оскільки значення відношень відповідають різним дефектам і в [2] не має дефектів з аналогічною комбінацією значень відношень. Для цих дефектів значення  $\text{CH}_4/\text{H}_2 > 0,1$  (тобто вище, ніж для ч.р.), значення  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1$ , що нижче, ніж для іскрових розрядів і розрядів низької енергії, а значення  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4 > 0,1$ , що, згідно з [5], свідчить про наявність розрядів. Графічні образи для таких дефектів наведено на рис. 3.

Як видно з табл. 3, для дефекту № 10 із трьох відношень пар газів суттєві значення вдалося отримати тільки для відношення  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  (значення концентрацій етану, етилену та ацетилену нижче аналітичного порога розпізнавання з табл. 1). Згідно табл. 2, така комбінація відношень газів більшою мірою відповідає нормальному старінню, однак істотне перевищення концентраціями водню і метану граничних значень для всіх 19 одиниць обладнання свідчить про наявність дефекту. Графічний образ (№ 10 на рис. 3) близький до еталонних образів для ч.р. з низькою і високою щільністю енергії (№ 1, рис. 1, і № 6, рис. 2).

У роботі [27] для високовольтного вводу 330 кВ дефект із подібним значенням відношень газів ідентифіковано як корону, такий же діагноз був поставлений і в [18] у результаті моделювання електричних розрядів у лабораторних умовах. У [28] аналогічний дефект ідентифіковано як розряди низької енергії (Low Energy Discharges).

Дефекти № 11–13 мають схожий вміст газів, газом із максимальною концентрацією є водень, супутнім газом є етан. Відмінності між ними полягають у вмісті етилену й ацетилену. Порівнюючи значення відношень газів з табл. 3 із регламентованими в [2] значеннями табл. 2, можна дійти висновку, що найбільш близькими за значеннями відношень  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  і  $\text{C}_2\text{H}_2/\text{C}_2\text{H}_4$  для цих дефектів є повзучі розряди. Але через низький вміст етилену відносно етану значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1$ , що, згідно з [2], нехарактерно для повзучих розрядів. Як показано в [12], графічний образ, аналогічний образу № 11 на рис. 3, був побудований за результатами АРГ трансформатора струму, в якому виявлені інтенсивні ч.р. При ремонті негерметичного вводу масляного вимикача 220 кВ, з аналогічними результатами АРГ, були виявлені значні відкладення X-воску. У зарубіжних джерелах, наприклад у [28], дефекти з подібними значеннями відношень газів також ідентифіковані як ч.р. У [12] образ, наведений на рис. 3 (№ 12), побудований за результатами АРГ обладнання з електричними розрядами низької енергії. У той же час у [16] для обладнання з аналогічним вмістом газів був поставлений діагноз низькотемпературний перегрів. У обладнанні, за результатами АРГ якого побудований образ № 13 на рис. 3, відповідно до [29] виявлено розряди високої енергії, хоча, як видно з табл. 3, значення відношення  $\text{C}_2\text{H}_4/\text{C}_2\text{H}_6 < 1$ . З чотирьох образів, на-

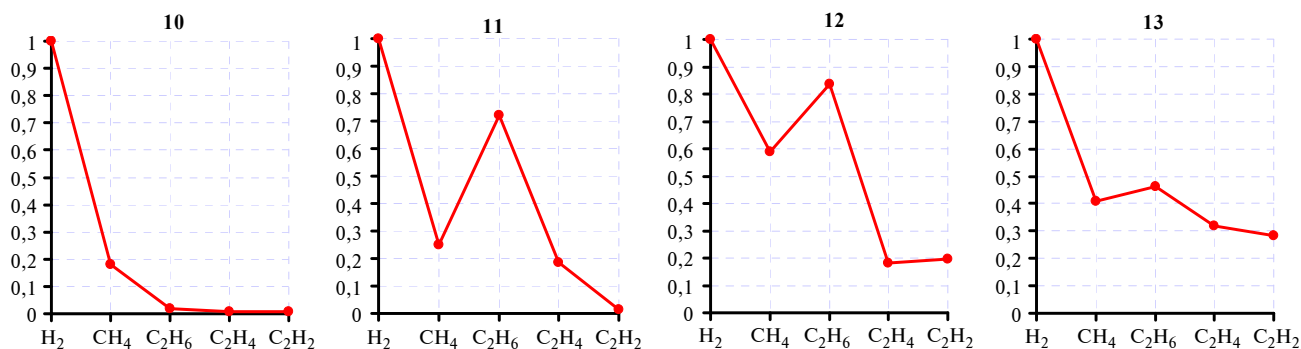


Рис. 3. Графічні образи, побудовані за результатами аналізу розчинених у маслі газів обладнання з розрядами

ведених на рис. 2, у [2] не регламентовано жодного. Найбільш близьким до регламентованого в [2] образу є образ № 10 на рис. 3.

### Іскрові і повзучі розряди

У чинному в Україні нормативному документі [2] вказані значення відношень газів для розрядів по поверхні – для повзучих розрядів (див. табл. 2), а графічні образи для іскрових і повзучих розрядів є ідентичними. Тобто має місце ототожнення цих двох дефектів. З точки зору фізики процесу основною причиною появи іскрових розрядів є порушення контактних з'єднань і виникнення “плаваючого потенціалу”. Також до виникнення іскріння може призвести наявність гострих кромки. Повзучі або поверхневі розряди зумовлені відкладенням забруднень або продуктів деструкції масла на поверхнях ізоляційних конструкцій і проростанням по них каналу розряду. Виконаний аналіз показав деякі відмінності у значеннях відношень газів і графічних образів, отриманих за результатами АРГ обладнання з такими дефектами. Значення відношень пар газів для обладнання, в якому виявлені іскрові та повзучі розряди, наведені в табл. 3 (№ 14–18), а графічні образи – на рис. 4.

Порівнявши значення з табл. 3 зі значеннями відношень газів, що регламентуються для

повзучих розрядів з табл. 2, легко побачити, що в умовах реальної експлуатації значення відношень газів істотно відрізняються як від нормованих, так і один від одного. Так, для дефектів № 14 і 15 значення відношення  $CH_4/H_2 < 0,1$ , що, відповідно до [2], характерно для часткових, а не для іскрових і повзучих розрядів. Однак результати розкриття і ремонту устаткування, зі значеннями відношень газів з групи дефектів № 14, свідчать про наявність іскріння в обладнанні. Так, у трансформаторі ТДТНГ-110/35/6 були виявлені сліди іскріння, викликаного ослабленням гайки на ввіді обмотки НН зі шпилькою вводу, але при цьому значення відношень становили:  $C_2H_2/C_2H_4 = 0,0478$ ,  $CH_4/H_2 = 0,096$  і  $C_2H_4/C_2H_6 = 4,42$ . У пробах масла з обладнання № 15 (див. табл. 3) має місце більш високий вміст ацетилену, у зв'язку з чим для проб масла з обладнання для цієї групи дефектів значення відношення  $C_2H_2/C_2H_4 > 0,1$ . Характерними пошкодженнями для обладнання зі значеннями відношень газів, що відповідають групі № 15, згідно з [12], є: сліди розрядів і вигорання магнітопроводу, сліди розрядів і перегрів болтового з'єднання контактора та низка інших. Характерною особливістю вмісту газів для обладнання, об'єднаного в групу № 16, є те, що значення відношення  $CH_4/H_2 > 0,1$  і значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6 > 1$ , а ось значення відношення

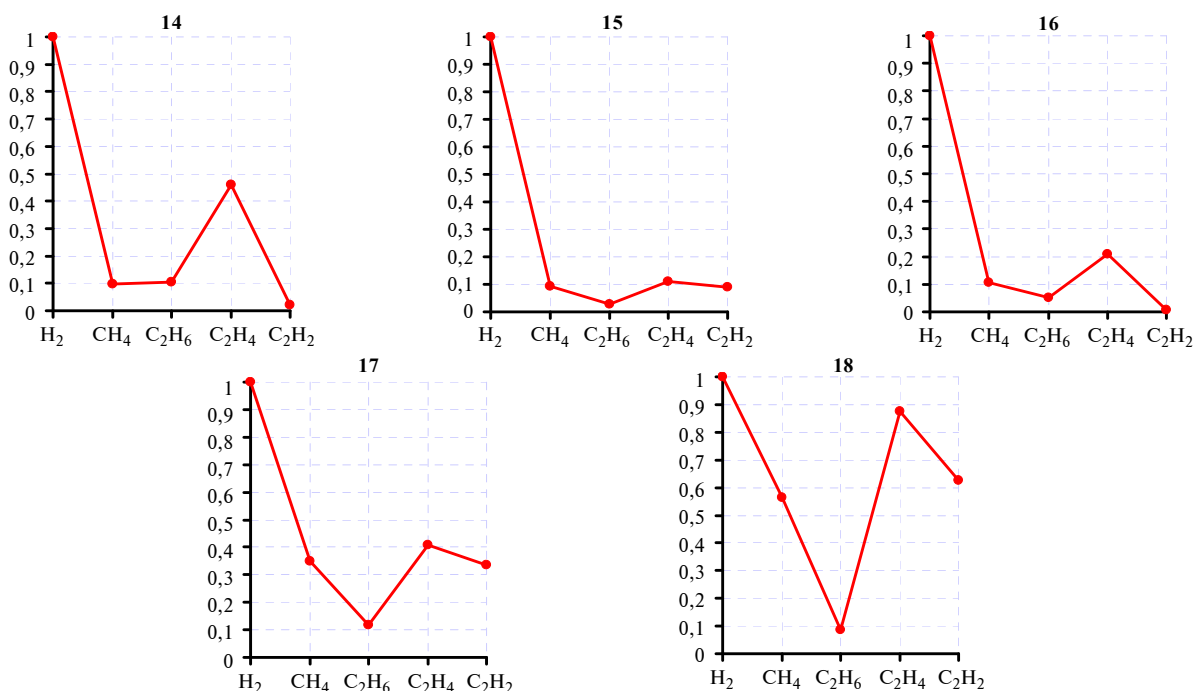


Рис. 4. Графічні образи, побудовані за результатами аналізу розчинених у маслі газів обладнання з іскровими і повзучими розрядами

$C_2H_2/C_2H_4 < 0,1$ . Як і для попередніх дефектів (№ 14, 15), такі значення відношень газів не регламентовані не тільки в [2], але й у відомих зарубіжних стандартах [3, 4]. А ось згідно з [5] така комбінація відношень газів відповідає перегріву в діапазоні температур менше  $150^\circ C$ . У відкритих зарубіжних джерелах для обладнання з аналогічними значеннями відношень газів були поставлені такі діагнози: в [23] – розряди низької енергії, в [18] – незначний нагрів, у [30] – ч.р. В обладнанні, що належить до групи № 17, за результатами розкриття устаткування були виявлені іскрові розряди [12]. У автотрансформаторі АОДЦТН 333000/750 [12] виявлено сліди іскрових розрядів на ізоляції магнітних шунтів системи шунтування бака автотрансформатора. У блочному трансформаторі 320 МВА 220/15,75 [12] за результатами акустичного обстеження і АРГ було виявлено стійкий розвинений частковий розряд (амплітудою до 70 тис. ПкЛ) з перекриттям по поверхні твердої ізоляції. Цей розряд був критичним із можливим переходом у пробою. А в трансформаторі ТМН 35/2500 виявлено відкладення пилу і продуктів розкладання масла. Незважаючи на те що за результатами розкриття обладнання були виявлені іскрові розряди, для 19 із 57 одиниць обладнання значення відношення  $CH_4/H_2$  або не перевищувало 0,3, або було вище 0,5, тобто виходило за рамки діапазону, що регламентується в [2]. Досить цікавим є те, що в зарубіжних джерелах [23, 28, 31] іскрові розряди ідентифікуються в основному як розряди високої енергії (High Energy Discharge).

Виконаний аналіз показав, що за розвитку повзучих розрядів (№ 18 з табл. 3) значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6$  перевищує 5, а ось значення відношення  $CH_4/H_2$ , як і в попередніх випадках (№ 16, 17), може виходити за межі, регламентовані в [2] для цього дефекту. Слід зазначити, що повзучі розряди, порівняно з іскровими, призводять до великих руйнувань ізоляції. Так, при розкритті автотрансформатора ОДТГА-80000/220 виявлено вигорання ізоляції шпильок, дотик стягуючих шпильок консолей, вигорання металу шпильки. При розкритті трансформатора напругою 35 кВ [12] було виявлено механічний надлом на фазі “С” обмотки вищої напруги (ВН) у місці переходу “мідь–алюміній” на виході вводу з обмотки і сліди розрядів. Слід зазначити, що в зарубіжних джерелах [23, 28] повзучі розряди ідентифікуються як розряди високої енергії. Незважаючи на істотні відмінності в значеннях від-

ношень пар газів, графічні образи на рис. 4 мають зовнішню схожість і збігаються з еталонним образом, що регламентується в [2].

### Розряди низької енергії

Згідно з [2], для розрядів низької енергії характерні такі діапазони значень відношень газів:  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ ,  $CH_4/H_2 = 0,1-0,5$  і  $C_2H_4/C_2H_6 > 1$ . Однак на практиці значення відношень газів для обладнання з розрядами низької енергії можуть варіюватися в широких межах і не завжди збігатися з регламентованими значеннями. У цьому легко переконатися, проаналізувавши значення відношень із табл. 3 для дефектів № 19–26. Графічні образи для цих дефектів наведено на рис. 5. Значення відношень  $C_2H_2/C_2H_4$  і  $C_2H_4/C_2H_6$  для дефекту № 19 відповідають розрядам низької енергії, а ось значення відношення  $CH_4/H_2 < 0,1$ . У роботі [32] дефект з аналогічними значеннями відношень газів був ідентифікований як дуга в маслі (Arcing in Oil), а в [28] – як корона низької енергії. Відношення газів для дефектів № 20–23 мають близькі значення ( $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ ,  $CH_4/H_2 > 0,1$  і  $C_2H_4/C_2H_6 < 1$ ), проте вміст газів і, як наслідок, графічні образи для цього обладнання суттєво різняться. Так, у пробах масла з обладнання для групи дефектів № 20 максимальний вміст має водень, супутні гази в основному метан і ацетилен, при цьому вміст етану вищий, ніж етилену. В [23] такі дефекти ідентифіковані як розряди низької та високої енергії. При розкритті вводу масляного вимикача 220 кВ, з аналогічними значеннями відношень газів, виявлені відкладення X-воску. У пробах масла обладнання з групи дефектів № 21 вміст газів був аналогічний вмісту газів для обладнання з групи № 20. Відмінність полягає у більш високому вмісту метану (значення відношення  $CH_4/H_2 > 0,9$ ). Слід зазначити, що майже для всіх 5 одиниць обладнання з групи дефектів № 21 розвиток дефекту закінчувався аварійним пошкодженням. У [12] наведено графічний образ, побудований за результатами АРГ для трансформатора напругою 125 кВ, гідроелектростанції “Nelson river”, Північна Канада (образ № 21 на рис. 5). Цей трансформатор був виготовлений у 1977 р і працював на 75 % потужності. Пошкодження сталося в серпні 1998 року. Причиною виходу трансформатора з ладу було пошкодження ізоляції між котушками і витковою ізоляцією. Образ побудований за результатами аналізу, зробленого



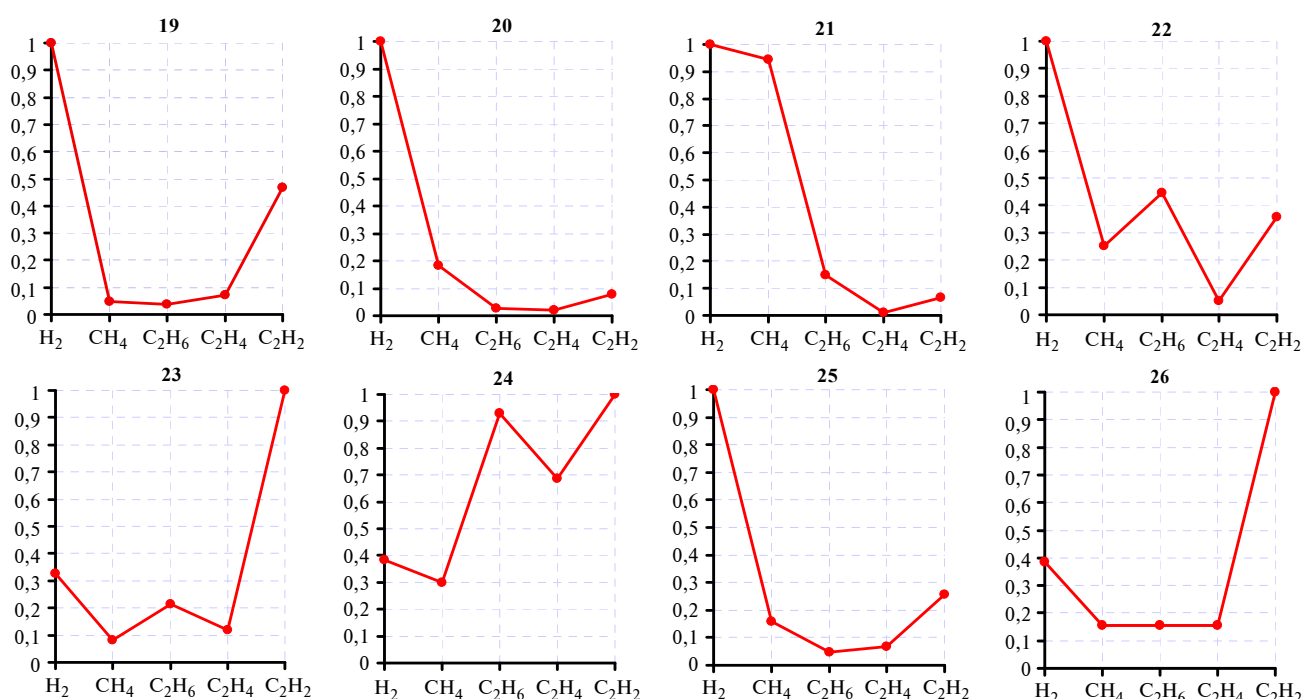


Рис. 5. Графічні образи, побудовані за результатами аналізу розчинених у маслі газів обладнання з розрядами низької енергії

відразу ж після пошкодження. В [23] для обладнання з аналогічними значеннями відношень газів був поставлений діагноз – електричні розряди високої енергії.

Відмінною особливістю вмісту газів обладнання із груп № 22–24 є те, що газом із максимальним вмістом є водень (для групи № 22) або ацетилен (для груп № 23, 24), а супутніми газами є етан і ацетилен (водень). При цьому вміст етану вищий, ніж метану. Графічний образ № 22, наведений на рис. 5, побудований за результатами АРГ трансформатора ТДТН-40/110/35/6 [12]. За результатами розкриття в цьому трансформаторі виявлені пошкодження ізоляції, наявність поверхневих розрядів на бар'єрі обмотки ВН. Як показано в [12] для обладнання з такими ж значеннями відношень газів, у різних зарубіжних джерелах був поставлений діагноз дуга в маслі, розряди високої енергії або корона високої енергії. Але при цьому, як видно з табл. 3, для цих дефектів значення відношень  $C_2H_4/C_2H_6 < 1$ .

Для обладнання з групи № 23 [12, 18] основними дефектами є іскріння між пружинами контактів пристрою регулювання під напругою, дугові розряди між контактами. Незважаючи на те що значення відношень газів для дефектів з груп № 23 і 24 мають близькі значення, вміст етану і етилену в обладнанні з групи № 24 на-

багато перевищує вміст цих газів у пробах масла з обладнання з групи № 23. Приклади діагностики обладнання з таким газовим вмістом наведені в [12, 33]. Як правило, такі дефекти характеризуються слідами розрядів і вигоранням ізоляції.

Наведені приклади наочно демонструють, що ідентичні значення відношень газів (№ 22–24) не завжди відповідають однаковому вмісту газів, більше того, навіть наявність ідентичного вмісту газів, але з різним процентним вмістом окремих газів (№ 23, 24), не означає схожості типу дефекту. Тому для розпізнавання типу дефекту, який прогнозується за результатами АРГ, доцільно використовувати як аналітичні, так і графічні методи розпізнавання, а також оцінювати вміст окремих газів у пробі масла.

Значення відношень газів для обладнання з груп № 25, 26 повністю відповідають значенням, що регламентуються в [2] для розрядів малої енергії. Відмінністю є те, що для дефектів з групи № 25 газом із максимальним вмістом є водень, а з групи № 26 – ацетилен. Як показано в [12], залежно від використовуваної методики такого роду дефекти інтерпретуються або як розряди малої, або як розряди великої потужності, або як критичні ч.р. З восьми образів, наведених на рис. 5, у [2] регламентовані тільки образи № 19, 20, 25.

Особливу увагу слід звернути на групу дефектів № 27, 28. Гази обладнання для цих груп дефектів характеризуються високим вмістом водню, етилену і ацетилену. Як видно з табл. 3, для цих дефектів значення відношень  $C_2H_2/C_2H_4 > 1$  і  $C_2H_4/C_2H_6 > 2$ , що характерно для розрядів високої енергії. Однак через низький вміст метану значення відношень  $CH_4/H_2 < 0,1$ , що викликає труднощі при розпізнаванні цих дефектів. Наприклад, у [28] подібний дефект ідентифіковано як частковий розряд, в [34] – як дуговий розряд, а в [35] – як дуга низької енергії. Графічні образи, найбільш характерні для цих дефектів, наведені на рис. 6, проте в [2] подібні образи не регламентовані.

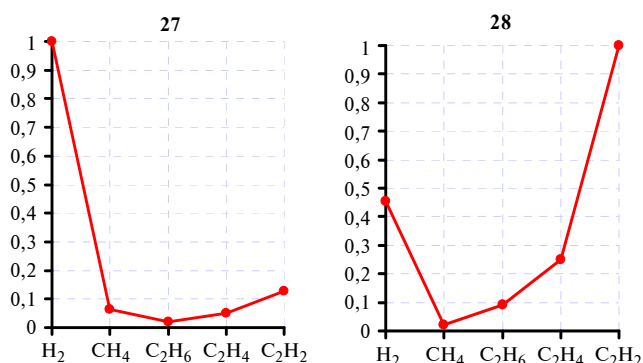


Рис. 6. Графічні образи, побудовані за результатами аналізу розчинених у маслі газів обладнання з дуговими розрядами низької енергії

### Розряди високої енергії

До розрядів високої енергії відносяться дугові розряди, іскріння, пробій масла між обмотками чи котушками або між котушками на землю. Згідно з [2], стійкий дуговий розряд супроводжується виділенням великої кількості енергії за невеликий проміжок часу. При цьому

газами з максимальним вмістом є водень і ацетилен. Графічні образи, побудовані за результатами АРГ обладнання з розрядами високої енергії, наведені на рис. 7, а значення відношень газів подані в табл. 3 (№ 29–31).

Згідно з [2], для дугових розрядів характерний стійкий вміст газів, а саме водню – 60–65 %, ацетилену – 25–28 %, етилену – 5–6 %, метану – 3–4 % і етану – 0,5 %. Однак для аналізованого устаткування з розрядами високої енергії (№ 29, 30 із табл. 3) вміст газів дещо відрізняється від зазначеного вище і регламентованого в [2]. Так, для дугових розрядів із максимальним вмістом водню (№ 29) вміст самого водню знаходиться на рівні 30–78 %, метану – 3–29 %, етану – 0–14 %, етилену – 0,5–28 %, ацетилену – 10–45 %. При цьому значення відношень газів для обладнання з таким дефектом (табл. 3, № 29) знаходяться в області нормованих значень (див. № 4 табл. 2). Значення відношень газів для обладнання з групи дефектів № 30 також відповідають розрядам високої енергії, проте вміст газів істотно відрізняється від газовмісту для дефекту № 29. Так, вміст водню не перевищує 2 %, метану – менше 1 %, етану – до 5 %, етилену – 1–45 %, а ацетилену – 50–98 %. Тобто для цього дефекту має місце підвищений вміст ненасичених вуглеводнів (ацетилену і етилену) за вкрай низького вмісту насичених вуглеводнів (метану і етану) та водню. В роботі [36] для обладнання з таким вмістом газів був поставлений діагноз розряди високої інтенсивності. В [37] аналогічний дефект був ідентифікований як ч.р. У [38] проаналізовано динаміку зміни в часі критеріїв, що використовуються для діагностики стану маслонаповненого обладнання за результатами АРГ під час розвитку дефектів у трансформаторах. Зокрема, проаналізовано динаміку зміни

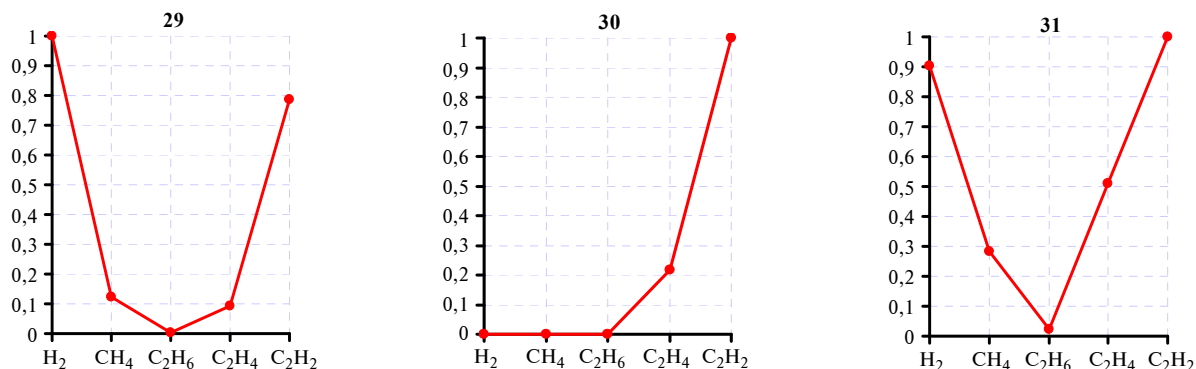


Рис. 7. Графічні образи, побудовані за результатами аналізу розчинених у маслі газів обладнання з розрядами високої енергії

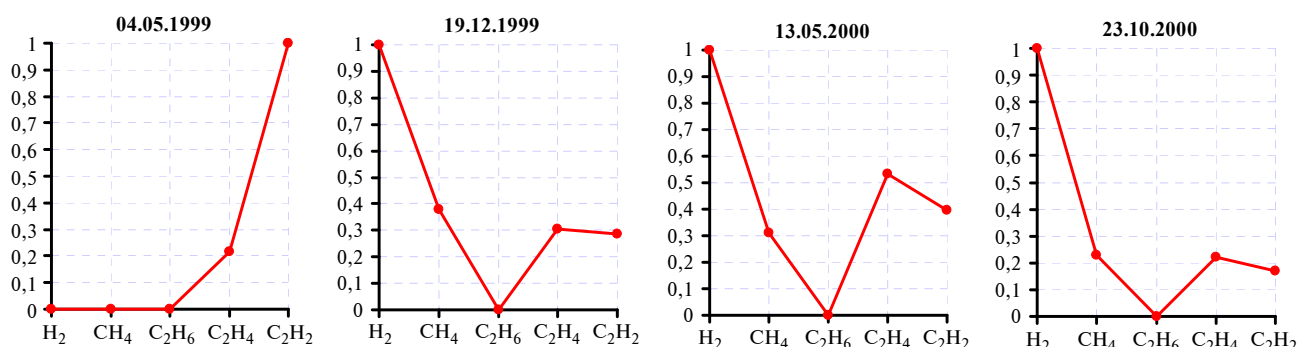


Рис. 8. Динаміка зміни графічних образів, побудованих за результатами аналізу розчинених у маслі газів для автотрансформатора 220 кВ, ПС “Буран” АТ-1

графічних образів у процесі розвитку дефекту для автотрансформатора ПС “Буран” 220 кВ (рис. 8). Як видно з рисунка, в АТ ПС “Буран” 220 кВ дефект починався як розряди високої енергії (№ 30), а з плином часу перейшов у повзучі розряди. При цьому з розвитком дефекту мало місце збільшення вмісту насичених вуглеводнів і водню. Наведений приклад показує, що ступінь небезпеки дефекту слід оцінювати з урахуванням можливої зміни типу дефекту в процесі його розвитку. Наприклад, переростання низькотемпературного дефекту в дефекти з більш високим рівнем енергії. Виконаний у [38] аналіз показав, що в багатьох випадках розвиток дефектів, у т.ч. й тих, що призводять до аварійного виходу обладнання з експлуатації, починалося з нагрівання з температурою 200–300 °С або ч.р.

В обладнанні з групи № 31 виявлено дугові розряди, за яких газом із максимальним вмістом є ацетилен. Для таких дефектів характерними є вміст водню від 4 до 45 %, метану – до 22 %, етану – 0–10 %, етилену – 4–36 %, ацетилену – від 25 до 88 %.

Наведені результати показують, що навіть в обладнанні з дефектами одного і того ж типу, для яких значення відношень газів знаходяться в заданих фіксованих межах і відповідають цьому типу дефекту, вміст газів змінюється в досить широких межах. Це призводить до того, що для дефектів одного і того ж типу графічні образи можуть істотно відрізнятися від еталонних образів та викликати труднощі під час встановлення діагнозу. Можливим напрямом усунення цього недоліку є реалізація алгоритму застосування не еталонних графічних образів, а еталонних областей, які враховують відмінності у вмісті газів. Пропозиція і підхід для такої реалізації запропоновані в [13], але підтвердження доцільності використання такого напрямку по-

требує окремої систематизації і аналізу результатів АРГ.

Практичне застосування отриманих у роботі значень відношень газів і відповідних їм графічних образів дасть змогу значно підвищити достовірність розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ як за рахунок уточнення значень відношень газів для деяких дефектів, так і за рахунок збільшення кількості різновидів дефектів, що розпізнаються згідно з чинним в Україні нормативним документом (31 замість 6).

## Висновки

Наведені в статті дані показують, що в умовах реальної експлуатації значення діагностичних критеріїв, які використовуються для розпізнавання типу дефектів, можуть істотно відрізнятися від значень, регламентованих чинними вітчизняними і закордонними нормативними документами. Більше того, для деяких дефектів значення відношень газів одночасно відповідають кільком дефектам, що значно ускладнює процедуру їх розпізнавання. Подібні відмінності обумовлені різними сортами масла, залитого в обладнання, різними конструкційними матеріалами, видами захисту масла, а також особливостями конструктивного виконання устаткування.

У зв'язку з цим має місце об'єктивна необхідність у корегуванні деяких положень чинного в Україні галузевого нормативного документа [2]. Оскільки з моменту видання і до цього часу у вказаний документ не вносились зміни, то, на думку авторів, під час його перегляду чи перевидання бажано:

– ввести градацію часткових розрядів за рівнем енергії (ч.р. з низькою і високою щільністю енергії), розділити іскрові та повзучі роз-

ряди, розширити діапазон значень відношень газів для електричних розрядів з низькою і високою щільністю енергії;

– з урахуванням уперше отриманих автограми та наведених у табл. 3 значень відношень газів доцільно скорегувати значення відношення  $C_2H_4/C_2H_6$  для ч.р. з низькою і високою щільністю енергії та розрядів низької енергії, а також значення відношення  $CH_4/H_2$  для часткових розрядів з низькою і високою щільністю енергії, іскрових і повзучих розрядів, дугових розрядів низької енергії. В разі відсутності достатнього обсягу статистичних даних, як діапазони значень відношень газів для означених дефектів можливо використовувати значення, наведені в табл. 3;

– розширити базу еталонних графічних образів з урахуванням образів, наведених у статті.

Подібного роду корегування дасть можливість підвищити достовірність розпізнавання типу дефекту і, як наслідок, експлуатаційну надійність високовольтного маслонаповненого обладнання.

Основним напрямом подальших досліджень є аналіз відношень газів, вмісту газів, а також графічних образів для високовольтного маслонаповненого обладнання з термічними та комбінованими дефектами з подальшою реалізацією отриманих результатів у вигляді комбінованого методу розпізнавання типу дефектів обладнання за результатами АРГ.

## References

- [1] B.A. Alekseev, *Monitoring of the State (Diagnostics) of Large Power Transformers*. Moscow, Russia: Izdatelstvo NTs ENAS, 2002.
- [2] *Diagnostics of Oil-Filled Transformer Equipment Based on Chromatographic Analysis of Free Gases Selected from Gas Relay and Gases Dissolved in Insulating Oil*, SOU-N EE 46.501:2006.
- [3] *Interpretation of the Analysis of Gases in Transformer and Other Oil Med Electrical Equipment in Geneva*, IEC Publication 60599, Switzerland, 1999.
- [4] *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers*, IEEE Standard C57.104-2008, Feb. 2009.
- [5] *Guidelines for the Diagnosis of Developing Defects in Transformer Equipment According to the Results of Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in Oil*, RD 153-34.0-46.302-00. Moscow: NTs ENAS, 2001.
- [6] V.B. Abramov, “Distinctive features of gas formation in transformer oil hermetic and unsealed high-voltage equipment”, *Novyny Energetiki*, no. 9, pp. 17–32, 2009.
- [7] V.B. Abramov, “Features of the control of oil-filled equipment according to the results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil”, *Elektricheskie Seti i Sistemy*, no. 4, pp. 77–79, 2012.
- [8] G.M. Boyarchukov, “Practical problems of assessing the state of high-voltage equipment on the content of gases in transformer oil”, *Novyny Energetiki*, no. 7, pp. 23–33, 2010.
- [9] O.V. Shutenko, “Analysis of the characteristics of the gas content of oils in unpressurized defect-free transformers”, *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu “Kharkivskiy Politekhnychniy Instytut”. Ser. Tekhnika ta Elektrofizyka Vysokyykh Napruh*, no. 38, pp. 84–97, 2017.
- [10] M.V. Kosteriev and Ye.I. Bardyk, *The Question of Constructing Fuzzy Models for Assessing the Technical Condition of Objects of Electrical Systems*. Kyiv, Ukraine: NTUU KPI, 2011.
- [11] P.D. Lezhniuk et al., “Diagnosis of power transformers using fuzzy sets”, *Visnyk Vinnytskoho Politekhnychnoho Instytutu*, no. 1, pp. 43–51, 2005.
- [12] O.V. Shutenko, “Analysis of graphic images based on the results of HDGA for high-voltage power transformers with various types of defects”, *Visnyk Natsionalnoho Tekhnichnoho Universytetu “Kharkivskiy politekhnychniy instytut”. Ser. Enerhetyka: Nadiinist ta Enerhoefektyvnist*, no. 31, pp. 97–121, 2017.
- [13] O. Shutenko and I. Jakovenko, “Fault diagnosis of power transformer using method of graphic images”, in *Proc. 2017 IEEE YSF-2017*, Lviv, Ukraine, Oct. 17–20, 2017, pp. 66–69. doi: 10.1109/YSF.2017.8126594
- [14] C.-P. Hung and M.-H. Wang, “Diagnosis of incipient faults in power transformers using CMAC neural network approach”, *Electric Power Syst. Res.*, vol. 71, no. 3, pp. 235–244. 2004. doi: 10.1016/j.epr.2004.01.019
- [15] I. Kaur and P. Singh, “Residual Life assessment with DGA, Furan content in transformer oil and Degree of polymerization of solid insulation”, *Int. J. Innov. Res. Electrical, Electronics, Instrument. Control Eng.*, vol. 6, no. 7, July 2016, pp. 230–234.
- [16] W. Feng et al., “Research of transformer intelligent evaluation and diagnosis method based on DGA”, *MATEC Web of Conferences*, vol. 77, pp. 1–6, 2016. doi: 10.1051/mateconf/20167701002

- [17] M. Mehulkumar B and A. Shahpatel, "Special approach to detecting incipient fault in power transformer using dissolved gas analysis", *Int. J. Innov. Res. Electrical, Electronics, Instrument. Control Eng.*, vol. 3, no. 5, May 2015, pp. 186–188. doi: 10.17148/IJIREICE.2015.3544
- [18] M. Duval, "A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers", *IEEE Electr. Insul. Mag.*, vol. 18, no. 3, pp. 8–17, 2002. doi: 10.1109/MEI.2002.1014963
- [19] A.Yu. Ryizhkina, "Analysis and improvement of chromatographic methods for diagnosing oil-filled high-voltage electrical equipment", Ph.D. dissertation, Novosibirsk, Russia, 2012.
- [20] M.M.B. Yaacob *et al.*, "DGA method-based ANFIS expert system for diagnosing faults and assessing quality of power transformer insulation oil", *Modern Appl. Sci.*, vol. 10, no. 1, pp 13–22, 2016. doi: 10.5539/mas.v10n1p13
- [21] A.R. Gouda and D. Patra, "Image processing based analysis of transformer oil", Bachelor thesis, Department of Electrical Engineering, National Institute of Technology, Rourkela, India, 2014, 63 p.
- [22] V.I. Komarov. (2008). *On the Effect of GK Oil on the Reliability of Electrical Equipment* [Online]. Available: <http://www.myshared.ru/slide/58746>
- [23] K. Shrivastava and A. Choubey, "A novel association rule mining with iec ratio based dissolved gas analysis for fault diagnosis of power transformers", *Int. J. Adv. Comp. Res.*, vol. 2, no. 2, pp. 34–44, 2012.
- [24] A.R. Hussein *et al.*, "Ann expert system for diagnosing faults and assessing the quality insulation oil of power transformer depending on the DGA method", *J. Theor. Appl. Inform. Technol.*, vol. 78, no. 2, pp. 278–285, 2015.
- [25] S. Ghoneim *et al.*, "Detection of faults in power transformers using an expertise method depending on DGA", in *Proc. 15th Int. Middle East Power Systems Conference (MEPCON'12)*, 2012, pp. 1–6.
- [26] U. Roland and O. Eseosa, "Artificial neural network approach to distribution transformers maintenance", *Int. J. Sci. Res. Eng. Technol.*, vol. 1, no. 4, pp. 62–70, 2015.
- [27] G.M. Boyarchukov, "Practical problems of assessing the state of high-voltage equipment on the content of gases in transformer oil", *Novyny Energetiki*, no. 10, pp. 24–33, 2010.
- [28] Ikb al Abulmageed Hameed, "Monitoring power transformer using fuzzy logic", *J. Eng. Develop.*, vol. 17, no. 6, pp. 146–163, 2013.
- [29] M.-J. Lin, "A new approach with three dimension figure and ANSI/IEEE C57.104 Standard rule diagnoses transformer's insulating oil", *Engineering*, vol. 6, no. 12, pp. 841–848, 2014. doi: 10.4236/eng.2014.612078
- [30] J. Liu *et al.*, "A comparative research on power transformer fault diagnosis based on several artificial neural networks", *J. Comput. Inform. Syst.*, vol. 18, pp. 7501–7508, 2013.
- [31] A.-P. Chen and C.-C. Lin, "Fuzzy approaches for fault diagnosis of transformers", *Fuzzy Sets and Systems*, vol. 118, no. 1, pp. 139–151, 2001. doi: 10.1016/S0165-0114(99)00115-3
- [32] N.A. Muhamad and S.A.M. Ali, "LabVIEW with fuzzy logic controller simulation panel for condition monitoring of oil and dry type transformer", *Proc. World Academy of Science: Engineering and Technology*, vol. 50, pp. 153–159, 2006.
- [33] S. Ghoneim and K.A. Shoush, "Diagnostic tool for transformer fault detection based on dissolved gas analysis", *Advances in Electrical Engineering Systems*, no. 3, vol. 1, pp 152–156, 2012.
- [34] H. Ahadpour, "A novel approach for diagnosis of power transformers internal faults using an electronic nose", *J. Basic Appl. Sci. Res.*, vol. 1, no. 7, pp. 808–815, 2011.
- [35] S.S.M. Ghoneim and I.B. Taha, "Artificial neural networks for power transformers fault diagnosis based on iec code using dissolved gas analysis", *Int. J. Control Automat. Syst.*, vol. 4, no. 2, pp. 18–21, 2015.
- [36] H.A. Illias *et al.*, "Transformer incipient fault prediction using combined artificial neural network and various particle swarm optimisation techniques", *PLOS ONE*, vol. 10, no. 6, e0129363, 2015. doi: 10.1371/journal.pone.0129363
- [37] Z.B. Sahri and R.B. Yusof, "Support vector machine-based fault diagnosis of power transformer using k nearest-neighbor imputed DGA dataset", *J. Comp. Commun.*, vol. 2, pp. 22–31, 2014. doi: 10.4236/jcc.2014.29004
- [38] O.V. Shutenko, "Features of the dynamics of changes in the criteria used to interpret the results of HDGA in power transformers with different types of defects", *Novoe v Rossiyskoy Elektroenergetike*, no. 9, pp. 30–49, 2017.

О.В. Шутенко, В.Б. Абрамов, И.С. Яковенко

#### ПРАКТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ РАСПОЗНАВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ТИПА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ В МАСЛЕ ГАЗОВ

**Проблематика.** Распознавание типа дефектов в высоковольтном маслонаполненном оборудовании, по результатам анализа растворенных в масле газов, с использованием значений критериев, которые регламентированы действующим в Украине нормативным документом, не всегда позволяет установить верный диагноз. С учетом того, что постановка ошибочного диагноза может привести к аварийному повреждению оборудования, рассматриваются пути повышения достоверности распознавания типа дефекта.

**Цель исследования.** Повышение достоверности распознавания типа дефектов высоковольтного маслонаполненного оборудования по результатам анализа растворенных в масле газов с использованием действующего в Украине нормативного документа.

**Методика реализации.** Выполнен сравнительный анализ значений отношений газов и графических образов для 31 разновидности дефектов электрического типа по 808 единицам маслонаполненного оборудования. Приведены краткая характеристика и значения отношений газов и графических образов для дефектов, распознавание которых вызывает затруднения с использованием действующего в Украине нормативного документа.

**Результаты исследования.** Установлено, что в условиях реальной эксплуатации значения диагностических критериев, используемых для распознавания типа дефектов, могут существенно отличаться от значений, регламентируемых действующими как в Украине, так и за рубежом нормативными документами. Более того, для некоторых дефектов значения отношений газов одновременно соответствуют разным дефектам, а эталонные графические образы отсутствуют, что значительно затрудняет процедуру их распознавания. Для устранения этих недостатков предложены графические образы и диапазоны значений отношений газов, которые позволяют распознавать большее количество разновидностей дефектов по сравнению с действующим в Украине нормативным документом – 31 вместо 6.

**Выводы.** Полученные и приведенные в работе диапазоны значений отношений газов и графические образы дефектов являются диагностической схемой, практическое использование которой позволяет значительно расширить диапазон дефектов, распознаваемых по результатам анализа растворенных в масле газов, и тем самым повысить эксплуатационную надежность высоковольтного маслонаполненного оборудования.

**Ключевые слова:** анализ растворенных в масле газов; отношение газов; графические образы; тип дефекта; частичные разряды; искровые разряды; ползучие разряды; дуга; X-воск; достоверность распознавания.

O.V. Shutenko, V.B. Abramov, I.S. Yakovenko

#### PRACTICAL ASPECTS OF RECOGNITION OF ELECTRIC TYPE DEFECTS ON THE ANALYSIS RESULTS OF GASES DISSOLVED IN OIL

**Background.** Recognition of the type of defects in high-voltage oil-filled equipment, based on the analysis of gases dissolved in oil, using the values of the criteria that are regulated by the normative document in force in Ukraine, doesn't always allow us to establish the correct diagnosis. Given that misdiagnosis can lead to accidental damage, ways to improve the reliability of defect type recognition are considered.

**Objective.** The aim of the paper is to increase the reliability of recognition of the type of defects in high-voltage oil-filled equipment, based on the analysis of gases dissolved in oil using the normative document in force in Ukraine.

**Methods.** A comparative analysis of the values of the ratios of gases and graphical images, for 31 types of electrical defects, for 808 units of oil-filled equipment was performed. A brief description and values of the ratios of gases and graphic images for defects, the recognition of which causes difficulties with the use of the normative document in force in Ukraine, is given.

**Results.** It is established that in real operation conditions the values of the diagnostic criteria used to recognize the type of defects can significantly differ from the values regulated by the normative documents in force both in Ukraine and abroad. Moreover, for some defects, the values of the gas ratios simultaneously correspond to different defects, and the reference graphic images are absent, which considerably complicates the procedure for their recognition. To eliminate these drawbacks, graphical images and ranges of values of gas ratios are offered, which allow us to recognize a greater number of varieties of defects, compared to the normative document in force in Ukraine, 31 instead of 6.

**Conclusions.** The ranges of values of gas ratios obtained and given in the work and the graphic images of defects are a diagnostic scheme, the practical use of which makes it possible to significantly expand the range of defects recognized by the analysis of gases dissolved in oil and thereby improve the operational reliability of high-voltage oil-filled equipment.

**Keywords:** analysis of gases dissolved in oil; gas ratio; graphic images; defect type; partial discharges; spark discharges; creep discharges; arc; X-wax; authenticity of recognition.

Рекомендована Радою  
факультету електроенерготехніки та  
автоматики КПІ ім. Ігоря Сікорського

Надійшла до редакції  
23 квітня 2018 року

Прийнята до публікації  
6 грудня 2018 року