

О. С. КУЛИК

РОЗПІЗНАВАННЯ ПЕРЕГРІВІВ У РІЗНИХ ДІАПАЗОНАХ ТЕМПЕРАТУР, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬСЯ РОЗРЯДАМИ З РІЗНИМ СТУПЕНЕМ ІНТЕНСИВНОСТІ, ЗА РЕЗУЛЬТАТАМИ АНАЛІЗУ РОЗЧИНЕНИХ В МАСЛІ ГАЗІВ

В умовах воєнного стану, а також післявоєнної відбудови країни, забезпечення надійного електропостачання населенню та промисловості лягає на плечі досить постарілого парку обладнання електроенергетичної галузі. На перший план виходить завдання забезпечити експлуатаційну надійність та подовжити термін експлуатації цього обладнання. Найбільш практичними, з точки зору експлуатації, є методи неруйнівної діагностики. Для неруйнівної діагностики стану високовольтних силових трансформаторів аналіз розчинених в маслі газів є найбільш розповсюдженим та використовуваним. Даний метод, використовуючи різні діагностичні критерії (значення відношень газів, відсотковий вміст газів тощо), дозволяє розпізнавати більшість дефектів (як електричного, так і термічного типу), що виникають в трансформаторі. Проте в процесі експлуатації можуть виникати, так звані комбіновані дефекти, тобто розряди, що переходять в перегрів, або перегрів, які супроводжуються розрядами. Крім того, в одному і тому ж трансформаторі можуть виникнути два і більше дефектів різного типу. Значення критеріїв, що використовуються для розпізнавання комбінованих дефектів, істотно відрізняються від значень критеріїв, характерних для термічних або електричних дефектів, що значно ускладнює процес розпізнавання. Метою статті є аналіз значень діагностичних критеріїв, а також надійність розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. Для комплексного аналізу були використані результати аналізу розчинених в маслі газів по 471 високовольтним силовим трансформаторам, в яких були виявлені перегріву у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. Аналізовані 471 значень були розбиті на 38 масивів даних з близькими значеннями відсоткового вмісту газів, відношеннями газів і зі схожими номограмами дефектів. На основі аналізу достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, з використанням норм та критеріїв, регламентованих найвідомішими стандартами та методиками, встановлено, що найбільшу достовірність розпізнавання забезпечують значення відношень газів, що регламентуються квадратом ETRA, а також метод номограм.

Ключові слова: комбіновані дефекти, аналіз розчинених в маслі газів (АРГ), відношення газів, відсотковий вміст газів, номограми дефектів, методи розпізнавання, надійність розпізнавання.

О. S. KULYK

RECOGNITION OF OVERHEATING IN DIFFERENT TEMPERATURE RANGES, WHICH IS ACCOMPANIED BY DISCHARGES OF DIFFERENT INTENSITY, BASED ON THE DISSOLVED GAS ANALYSIS

In wartime and post-war reconstruction, it is the responsibility of a rather ageing fleet of electricity generation equipment to provide a reliable supply of electricity to the households and industry. The challenge is to ensure operational reliability and to extend the service life of this equipment. Non-destructive testing methods are the most practical in terms of operation. For non-destructive testing of high-voltage power transformers, the dissolved-oil gas analysis is the most common and widely used method. This method, using various diagnostic criteria (value of gas ratios, percentage of gases, etc.), allows most of the defects (both electrical and thermal type) occurring in a transformer to be detected. However, during operation, so-called combined defects can occur, i.e. discharges turning into overheating, or overheating accompanied by discharges. In addition, two or more defects of different types can occur in the same transformer. The values of the criteria used for the recognition of the combined defects differ significantly from the values of the criteria typical for thermal or electrical defects, which significantly complicates the recognition process. The purpose of this article is to analyse the values of diagnostic criteria as well as the recognition reliability of overheating in different temperature ranges, accompanied by discharges with different intensity. For a comprehensive analysis, the results of dissolved gas analysis were used for 471 high-voltage power transformers in which overheating in different temperature ranges, accompanied by discharges of different intensity, were detected. The 471 analysed values were split into 38 arrays with similar gas percentages, gas ratios and defect nomograms. Based on an analysis of the recognition reliability of overheating in different temperature ranges, using the norms and criteria regulated by the best known standards and methods, it was found that the highest recognition reliability is provided by the values of gas ratios, which are regulated by the ETRA Square and also by Nomogram method.

Keywords: combined defects, dissolved gas analysis (DGA), gas ratio, gas percentage, defect nomograms, recognition methods, recognition reliability.

Вступ. В умовах воєнного стану, а також післявоєнної відбудови країни, забезпечення надійного електропостачання населенню та промисловості лягає на плечі досить постарілого парку обладнання електроенергетичної галузі. Враховуючи стан економіки країни про планове оновлення постарілого парку трансформаторного обладнання, як одного з найбільш розповсюджених, дороговартісних та відповідальних серед усього парку електротехнічного обладнання, можна поки що забути. Тому, на перший план виходить завдання забезпечити експлуатаційну надійність та подовжити термін експлуатації цього

обладнання. У даному випадку найбільш практичними, з точки зору експлуатації, є методи неруйнівної діагностики високовольтного маслонаповненого обладнання. Для неруйнівної діагностики стану високовольтних силових трансформаторів аналіз розчинених в маслі газів (АРГ) є найбільш розповсюдженим та використовуваним. Даний метод, використовуючи різні діагностичні критерії (значення відношень газів, відсотковий вміст газів, значення відношення газів до газу з максимальним вмістом) [1], дозволяє розпізнавати більшість дефектів (як електричного, так і термічного типу), що виникають в

© О. С. Кулик, 2022

трансформаторі. Проте в процесі експлуатації можуть виникати, так звані комбіновані дефекти, тобто розряди, що переходять в перегрів, або перегриви, які супроводжуються розрядами. Крім того, в одному і тому ж трансформаторі можуть виникнути два і більше дефектів різного типу. Значення критеріїв, що використовуються для розпізнавання комбінованих дефектів, істотно відрізняються від значень критеріїв, характерних для термічних або електричних дефектів, що значно ускладнює процес розпізнавання.

Аналіз основних досягнень і літератури. На сьогодні досить велика кількість публікацій присвячена питанню порівняльного аналізу методів інтерпретації результатів АРГ. Проте зазвичай такий аналіз виконується у вигляді порівняння традиційних методів розпізнавання з удосконаленими. Удосконалення традиційних методів розпізнавання найчастіше виконується за рахунок використання більш досконалого математичного апарату, як-от штучної нейронної мережі [2], нечіткої логіки [3], методу векторної релевантності та нейронної мережі з архітектурою ANFIS [4], синтезу інформації на основі декількох класифікаторів [5], мультикласифікації з використанням гаусівського процесу [6], класифікатора К найближчих сусідів [7] тощо. Зазвичай удосконаленню та порівнянню піддається не більше 4 стандартів та методик, як-от IEC 60599 [8] та метод відношення Роджерса [9]. Дещо рідше розглядається більше 4 методів інтерпретації результатів АРГ [10, 11]. Аналіз літературних джерел показав, що значення діагностичних критеріїв (відсотковий вміст газів, значення відношень газів, значення відношень газів до газу з максимальним вмістом) як для електричних [12–14], так і для термічних [15–18] дефектів досліджено достатньо ґрунтовно. В той же час, для дефектів комбінованого типу, особливо перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, наявні публікації [19–22] стосуються лише низько- та середньотемпературних перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, а от високотемпературні – не розглянуті. Таким чином, комплексний аналіз значень діагностичних критеріїв, а також надійності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, з використанням різних стандартів та методик є актуальним та має практичне спрямування.

Мета статті. Аналіз значень діагностичних критеріїв, а також надійності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, з використанням різних стандартів та методик.

Аналіз методів розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. Станом на сьогодні відомо 2 десятки різних методів розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ [8, 9, 23–40]. Аналіз даних методів показав, що більшість із

них дозволяють розпізнавати 6 дефектів, регламентованих міжнародним стандартом IEC 60599 [8]. Декілька методів дозволяють розпізнавати менше 5 типів дефектів – методика CIGRE [23], Дорненбурга [24] та ключового газу [25] (5 та по 4 відповідно). На противагу вказаним деякі методи дозволяють розпізнавати більше 8 типів дефектів. Метод номограм [26] дозволяє розпізнати 13 типів дефектів, Роджерса [9] – 12, комбінований п'ятикутник Дювала [27] та семикутник Гауда [28] – по 10, MSS [29] та 3 відношень [30] – по 9, а національний стандарт України [31] – 8.

В той же час, серед проаналізованих методів лише третина дозволяє розпізнавати комбіновані дефекти. Нижче наведені відомі стандарти та методики, а також значення діагностичних критеріїв, що регламентовані цими стандартами та методиками, для розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності.

1. Метод номограм [26] (або графічних образів) була запропонована японськими дослідниками. Для побудови використовуються значення відношень 5 газів – водню (H_2), метану (CH_4), етану (C_2H_6), етилену (C_2H_4) та ацетилену (C_2H_2) – до газу з максимальним вмістом. Всього даним методом регламентовано 14 номограм (графічних образів) [31], серед яких лише 4 відповідають комбінованим дефектам (рис. 1).

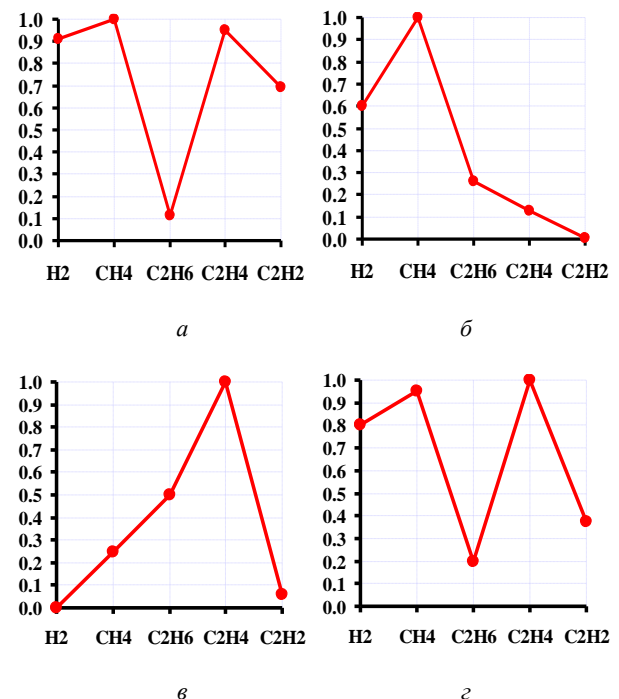


Рисунок 1 – Еталонні номограми для розпізнавання комбінованих дефектів з використанням методу номограм:

a – перегриви, що переходять у дугу;

b – перегриви, що переходять у ЧР;

v і z – перегриви, що переходять у розряди

2. Квадрат ETRA [32] – це графічна методика, яка буда розроблена в Японії в Electric Technology Research Association. Для розпізнавання типу дефекту використовуються значення відношень C_2H_2/C_2H_6 і

C_2H_4/C_2H_6 . Область комбінованих дефектів обмежена значеннями $C_2H_4/C_2H_6 > 1$ і $0,01 < C_2H_2/C_2H_6 < 1$.

3. Метод MSS [29] – аналітичний метод авторства німецький вчених Р. Мюллера, Х. Шлізінга та К. Зольднера. Даний метод дозволяє розпізнавати два типи комбінованих дефектів. Для розпізнавання розрядного і термічного дефекту регламентовані наступні значення відношень газів: $1 \leq H_2/CH_4 < 3$, $C_2H_4/C_2H_6 \geq 1$, $0,3 \leq C_2H_2/C_2H_6 < 3$. Для розпізнавання термічного дефекту і часткові розряди (ЧР) використовуються наступні значення відношень: $H_2/CH_4 > 10$, $C_2H_4/C_2H_6 \geq 1$, $C_2H_2/C_2H_6 < 0,3$.

4. Трикутник Дюваля 1 [33] – один з найвідоміших графічних методів розпізнавання, розроблений відомим канадським фахівцем М. Дювалем у 1974 р. Для розпізнавання типу дефекту в даному методі використовується відсотковий вміст CH_4 , C_2H_4 та C_2H_2 . Область комбінованих дефектів у цьому методі має складну геометрію, однак сумарно вона обмежена 4–29 % C_2H_2 , до 96 % CH_4 та до 85 % C_2H_4 .

5. Метод 3 відношень [30] розроблений єгипетськими науковцями О. Гауда, С. Х. Ель-Хоши та Х. Х. Ель-Тамали. Для розпізнавання типу дефекту в даному методі використовуються наступні відношення газів:

$$R1 = \frac{C_2H_6 + C_2H_4}{H_2 + C_2H_2};$$

$$R2 = \frac{C_2H_2 + CH_4}{C_2H_4};$$

$$R3 = \frac{C_2H_2}{C_2H_4}.$$

Для розпізнавання комбінованих дефектів вказані відношення повинні мати наступні значення: $R1 > 0,9$, $R2 \leq 0,5$ і $R3 \leq 3,5$.

6. Трикутник Гауда [34] – це графічний метод розроблений все тими ж єгипетськими науковцями О. Гауда, С. Х. Ель-Хоши та Х. Х. Ель-Тамали. Даний метод подібний до трикутника Дюваля 1 проте, замість відсоткових значень 3 газів, у цьому методі використовуються значення 3 відношень газів, трансформованих у відсоткову трикутну систему координат. Для розпізнавання типу дефекту в даному методі використовуються наступні відношення газів:

$$R1 = \frac{C_2H_4}{CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4 + C_2H_2};$$

$$R2 = \frac{C_2H_2}{H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_4};$$

$$R3 = \frac{C_2H_4}{H_2 + CH_4 + C_2H_6 + C_2H_2}.$$

Як і у трикутнику Дюваля 1, область комбінованих дефектів у даному методі має складну

геометрію, однак сумарно вона обмежена до 65 % R1, 6–22 % R2 та 29–90 % R3.

7. Семикутник Гауда [28] – це графічний метод розроблений все тими ж єгипетськими науковцями О. Гауда, С. Х. Ель-Хоши та Х. Х. Ель-Тамали. Для розпізнавання типу дефекту використовуються відсоткові значення 7 газів – окрім водню (H_2), метану (CH_4), етану (C_2H_6), етилену (C_2H_4) та ацетилену (C_2H_2) використовуються також оксид (CO) та діоксид вуглецю (CO_2), що дозволяє розпізнавати пошкодження целюлозної ізоляції з різним ступенем пошкодження. Область комбінованих дефектів у даному методі, як і у трикутниках Дюваля [33] та Гауда [34], має складну геометрію (область TD на рис. 2).

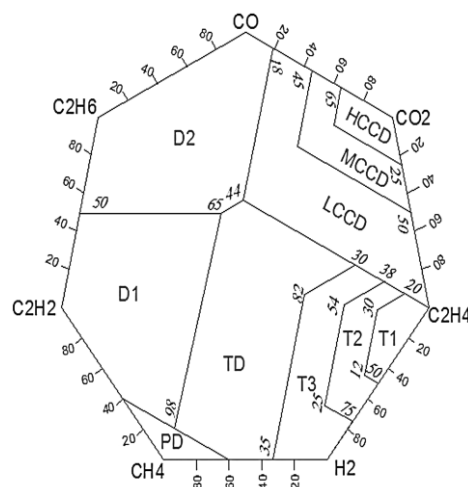


Рисунок 2 – Області дефектів у семикутнику Гауда [28]

Таким чином, враховуючи, що зазначені методи використовують різні діагностичні критерії для розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, та дозволяють розпізнавати різну кількість типів дефектів питання комплексного аналізу розпізнавання комбінованих дефектів різними методами є актуальним та має практичне значення.

Аналіз значень діагностичних критеріїв, що використовуються для розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. Враховуючи наведені раніше діапазони діагностичних критеріїв для розпізнавання комбінованих дефектів різними стандартами та методиками, існує практичний інтерес оцінити та порівняти діапазони значень даних діагностичних критеріїв, а також проаналізувати номограми дефектів, для трансформаторів з перегрівом у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. Для цього пропонується підхід, у якому використовуються одночасно як значення відношень газів, так і значення відсоткового вмісту газів, а також значення відношень газів до газу з максимальним вмістом, які представляються у вигляді графічних областей. Такий підхід дозволяє не тільки нівелювати можливі протиріччя в діагнозах, отриманих з

використання різних діагностичних критеріїв, а й істотно підвищити розпізнавання не тільки дефектів електричного типу [12–14] і термічного [15–18], але і для комбінованих дефектів в діапазоні низьких і середніх температур [19–22]. Для високотемпературних перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, такий підхід використовується вперше.

В якості вихідних даних для аналізу використовувалися результати експлуатаційних іспитів 471 силового трансформатора. Частина даних вже використовувалася при аналізі комбінованих дефектів в діапазоні низьких і середніх температур [19–22], проте в даних роботах була використана значно менша кількість методів розпізнавання. Таким чином, отримані в даній роботі результати є уточненням та доповненням до результатів вказаних робіт, а також дозволять провести порівняння з результатами для високотемпературних перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. На першому етапі досліджень результати АРГ були розбиті на кілька масивів відповідно до температури перегрівів та енергії розрядів. Далі для кожного з 471 трансформаторів були визначені відсотковий вміст H_2 і газів вуглеводневого ряду (CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 і C_2H_2), розраховані значення характерних відношень газів і побудована 471 номограма дефектів. Після, аналогічно до [14–22], сформовані масиви були скориговані з метою забезпечення ідентичності значень відсоткового вмісту газів і відношень газів, а також схожості номограм дефектів. В результаті були сформовані 38 масивів даних, відповідних перегрівам у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, але при цьому мають близькі значення діагностичних критеріїв. Діапазони зміни відсоткового вмісту газів наведені в табл. 1, а діапазони значень відношень газів – у табл. 2. У табл. 1 у стовпці 1 позначена температура перегрівів, у стовпці 2 – тип електричного дефекту (ЧР відповідає частковим розрядам, І – іскровим розрядам, Р – розрядам, Д – дуговим розрядам), а у стовпці 3 – обсяг вибіркового значень. Жирним у табл. 1 виділено газ з максимальним вмістом.

Використовуючи запропонований в [41] підхід номограми дефектів були представлені у вигляді графічних областей (рис. 3–5), що дозволяє врахувати відмінності в вмісті газів, обумовлені індивідуальним характером однотипних дефектів. Для зручності аналізу номер області відповідає номерам дефектів з табл. 1 і 2. Пунктирними лініями на рисунках виділені верхня і нижня межі областей. Суцільною лінією позначені центри областей, які збігаються з номограмами дефектів.

Таблиця 1 – Відсотковий вміст газів в обладнанні з перегрівом у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності

№	1	2	3	Вміст газів, %					
				H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	
1	150–300 °C	ЧР	18	14–46	1,9–32	30–81	0,6–11	0–2,5	
2			25	10–40	0–25	27–75	0,1–32	0–1,96	
3			22	11–40	36–68	7–22	0,8–13	0–2,8	
4		І	5	0,9–7	0,9–13	55–87	5–15	4,5–11	
5			5	10–40	1–12,6	27–50	7–23	4–23	
6			3	10–33	35–65	10–20	5–8	0,8–6	
7			7	8–32	24–42	13–30	12–20	3–12	
8		Р	9	1,2–14	3,7–32	45–82	2–15	5–17	
9			5	0,35–16	0,2–7,6	67–98	0,1–10	0,4–13	
10			4	15–25	20–30	25–35	1–12	10–30	
11			4	0–3	55–73	0–0,6	0–0,2	24–44	
12			6	0–13	55–68	20–38	0,12–0,22	0,16–3,5	
13			4	6–10	32–60	12–29	3–10	9–30	
14			9	19–46	34–57	0,02–26	0,004–8	2,6–13	
15			3	20–36	30–45	2–8	5–9	14–25	
16			7	2–18	55–85	0,2–6	4–11	5–25	
17			Д	8	10–30	7–15	25–45	3–21	9–32
18		5		10–23	14–24	22–35	10–22	12–28	
19		8		0,6–24	30–50	0–5	6–28	20–38	
20	300–500 °C	І	11	15–41	29–44	5–15	5–20	3–17	
21		Р	11	0–10	33–57	0,02–24	24–40	3–22	
22			20	10–35	28–79	1–18	6–29	1–8	
23		Д	10	10–28	20–45	0,06–20	21–29	12–20	
24	>700 °C	ЧР	13	0–5	10–17	10–17	60–78	0–2,75	
25		І	19	0,5–27	0–13	0–13	52–92	0–6,6	
26			16	1–25	0–9	3–17	60–90	0–5,0	
27			27	25–48	0,04–17	0,005–10,1	39–63	0–8,3	
28		Р	11	25–41	0,003–8	0,02–9,8	45–70	0–11,6	
29			10	9–15	9–15	9–15	50–70	0–13	
30			13	0–6,5	1,5–9,5	7–17	70–87	0–5	
31			22	19–34	16–28	3–10	33–50	0–10	
32			19	12–25	10–20	0,5–8	50–68	0–10	
33			19	10–30	14–32	0–10	30–60	4–13	
34			12	0–10	10–20	5–14	54–70	6–16	
35			Д	7	7–15	4–10	5–11,5	35–58	15–40
36				19	6–23	4–15	2–10	39–70	10–30
37				25	1,4–26	7–33	0,7–10	28–53	6,5–39
38	27			20–33	6–26	0,9–7,2	26–40	12–30	

Проаналізувавши значення відношень газів, наведені у табл. 2, та порівнявши їх зі значеннями, що рекомендуються відомими стандартами та методиками з інтерпретації результатів АРГ можна побачити, що значення C_2H_4/C_2H_6 дозволяє легко ідентифікувати температуру перегрівів – з ростом температури значення відношення збільшується. За температур до 300–350 °C $C_2H_4/C_2H_6 < 1$, в діапазоні 350–700 °C значення C_2H_4/C_2H_6 знаходиться в діапазоні 1–4, а при температурі понад 700 °C – більше 1. У той же час, ідентифікація енергії розрядів викликає складнощі, оскільки різними методами регламентовані різні значення діагностичних критеріїв для розпізнавання виду електричних дефектів. Наприклад, національним

стандартом України [30] регламентовано, що наявність розрядів малої та великої енергії вказує значення $C_2H_2/C_2H_4 > 1$, проте для високотемпературних комбінованих дефектів газом з максимальним вмістом ϵC_2H_4 , тому дане відношення не перевищує 1. В той же час, методика CIGRE [23] та квадрат ETRA [32] регламентують наявність дефекту електричного типу за $C_2H_2/C_2H_6 > 1$, проте і в даному випадку є обмеження з розпізнавання.

Слід зазначити, що серед еталонних номограм, що регламентуються діючими стандартами [26, 31], відсутні номограми характерні для перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються іскровими розрядами, та з C_2H_6 в якості ключового

газу. Аналізуючи графічні області дефектів, наведені на рис. 3–5 і порівнюючи центри областей з еталонними номограмами, наведеними на рис. 1, легко побачити, що із 38 отриманих номограм еталонним відповідають тільки 4 (№ 3, 23, 33 і 37), тобто 34 номограми отримані вперше. Крім того, незважаючи на певну схожість деяких номограм між собою, наприклад, для дефектів № 3 і № 6, є певна різниця у відсотковому вмісті газів та у значеннях відношень характерних газів, що наочно видно із табл. 1 та 2. Дані обставини дозволяють істотно підвищити кількість розпізнаваних дефектів з використанням методу номограм.

Таблиця 2 – Значення відношень газів в обладнанні з перегрівом у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності

№	Значення відношень газів						№	Значення відношень газів					
	$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$		$\frac{C_2H_2}{H_2}$	$\frac{C_2H_6}{CH_4}$	$\frac{C_2H_4}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{CH_4}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_6}$	$\frac{C_2H_2}{C_2H_4}$
1	0,5–0,96	1,1–4,98	0,018–0,29	0,003–0,09	0,0006–0,053	0,0086–0,273	20	1–1,3	0,13–0,45	1,1–2,1	0,08–0,47	0,53–1,44	0,258–1,0
2	0,23–0,87	1,48–16,92	0,14–0,88	0,015–0,045	0,001–0,03	0,008–0,0344	21	4,5–9,5	0,03–0,696	1,3–22	0,08–0,53	0,2–7,1	0,11–0,77
3	1,3–4,9	0,15–0,53	0,47–0,75	0,002–0,05	0,01–0,18	0,02–0,28	22	1,05–7,8	0,05–0,61	1,1–3,5	0,01–0,27	0,18–1,0	0,15–0,43
4	1,09–10,15	1,22–7,532	0,06–0,45	0,474–0,90	0,057–0,45	0,609–1,0	23	1,09–2,22	0,06–0,9	2,22–12	0,4–0,9	1–7,8	0,45–0,9
5	0,125–0,85	2,86–3,90	0,29–0,674	0,76–1,466	0,195–0,525	0,669–0,797	24	2,4–4,3	0,93–1,42	4,0–7,2	0,05–0,18	0,05–0,19	0,009–0,04
6	1,1–6,0	0,21–0,52	0,36–0,52	0,016–0,09	0,07–0,42	0,13–0,97	25	0,1–0,5	0,14–0,98	4,3–61,0	0,0001–0,268	0,001–0,27	0,0001–0,08
7	1,1–1,8	0,39–0,98	0,5–0,97	0,16–0,52	0,38–0,54	0,42–0,81	26	0,12–0,98	1,1–10,4	4,5–19,5	0,04–1,88	0,006–0,4	0,0003–0,076
8	1,5–2,55	1,46–19,26	0,035–0,21	0,234–1,33	0,069–0,25	1,0–3,326	27	0,17–0,52	0,3–0,99	4,1–16,6	0,009–0,65	0,028–1,0	0,0001–0,2
9	0,18–0,92	10–396,6	0,004–0,13	0,63–12,64	0,004–0,18	1,34–7,36	28	0,11–0,26	1,03–2,6	6,5–12,0	0,1–3,02	0,09–2,9	0,01–0,25
10	1,0–1,7	1,02–1,22	0,049–0,4	0,5–1,0	0,41–0,97	1,03–19,8	29	0,88–1,2	0,88–1,1	4,2–7,0	0,1–0,1,0	0,1–1,0	0,02–0,25
11	4,77–9,4	0,22–0,875	0,23–0,57	0,33–0,76	0,59–1,94	1,03–5,2	30	1,6–4,1	1,25–4,43	4,51–11,80	0,03–2,92	0,017–0,66	0,003–0,055
12	4,7–10,3	0,34–0,61	0,003–0,007	0,003–0,062	0,004–0,11	1,32–25,5	31	0,56–0,99	0,16–0,61	4,09–12,8	0,02–0,38	0,06–0,63	0,015–0,128
13	4,5–9,0	0,22–0,875	0,229–0,573	0,15–0,8	0,59–1,95	1,03–5,2	32	0,67–0,98	0,14–0,58	6,8–26,4	0,003–0,304	0,009–1,63	0,001–0,13
14	1,1–2,25	0,005–0,735	0,138–0,815	0,0047–0,367	0,172–12,2	1,0–1,9	33	1,01–2,7	0,11–0,455	5,3–21,1	0,12–0,65	0,58–3,65	0,1–0,31
15	1,07–2,25	0,05–0,238	1–2	0,35–0,76	3,1–5,9	2,3–5	34	1,8–3,6	0,4–1,1	4,4–10,0	0,4–1,25	0,65–1,2	0,1–0,25
16	4,5–11,4	0,03–0,096	1,5–5,3	0,148–0,4	2,8–6,12	1,15–3,5	35	0,3–0,89	1,2–1,5	4,3–7,12	2,3–6,12	1,4–6,6	0,28–0,96
17	0,258–0,92	2,32–4,22	0,102–0,74	0,64–3,58	0,218–0,98	1,32–4,813	36	0,36–0,65	0,42–0,86	4,5–20,5	1,6–3,5	2,6–6,0	0,16–0,67
18	1,01–1,4	1,2–2,295	0,382–0,94	0,53–1,868	0,42–0,999	1,061–2,13	37	1,04–1,81	0,08–1,191	4,58–12,95	0,23–5,36	1,57–7,3	0,22–0,95
19	1,7–3,1	0,03–0,098	2,2–9,8	0,49–0,72	6–13,5	1,1–3,6	38	0,2–0,98	0,14–1,12	4,1–12,95	0,49–4,3	2,5–9,5	0,34–0,98

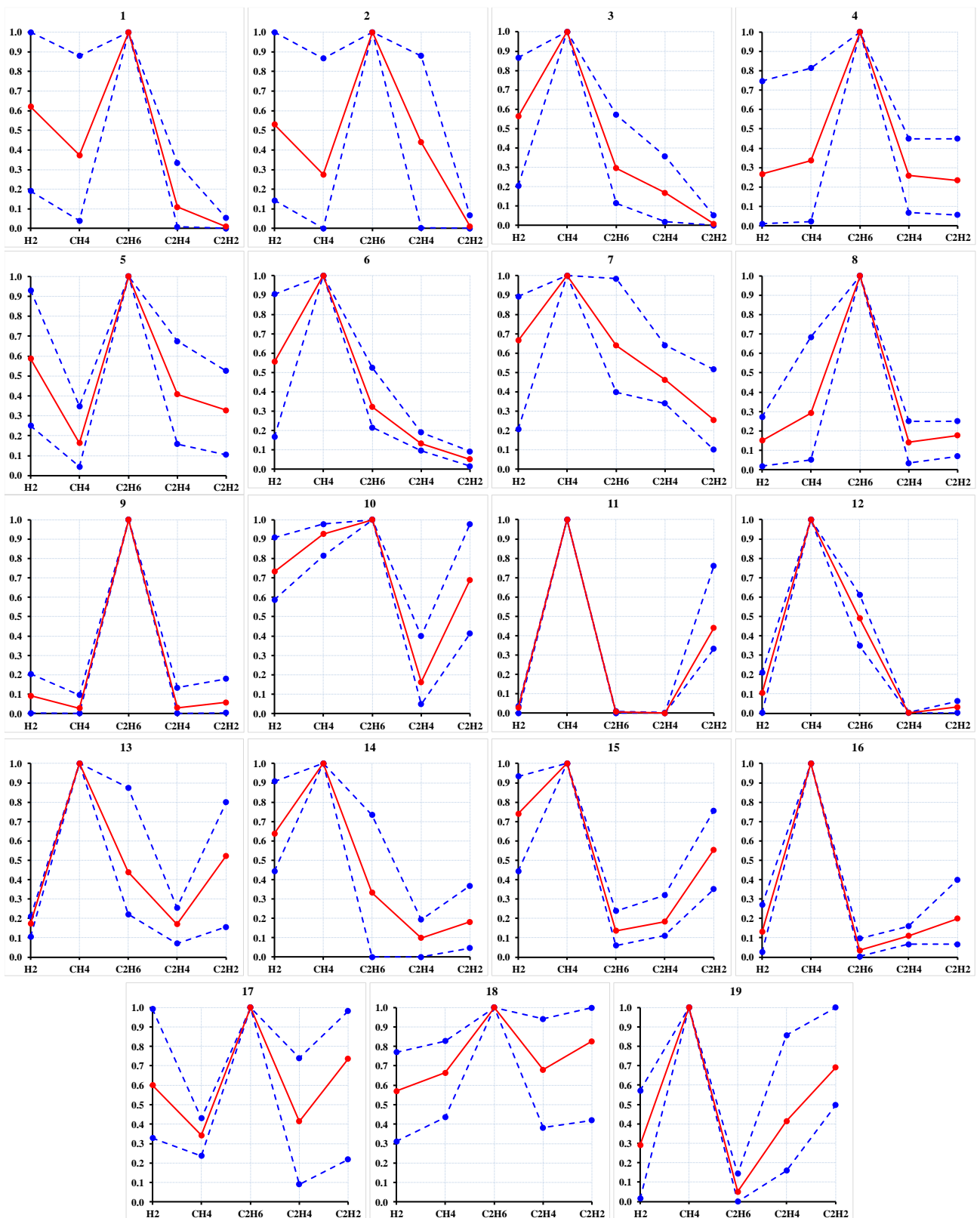


Рисунок 3 – Номограми низькотемпературних перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності: 1–3 – ЧР; 4–7 – іскрові розряди; 8–16 – розряди; 17–19 – дугові розряди

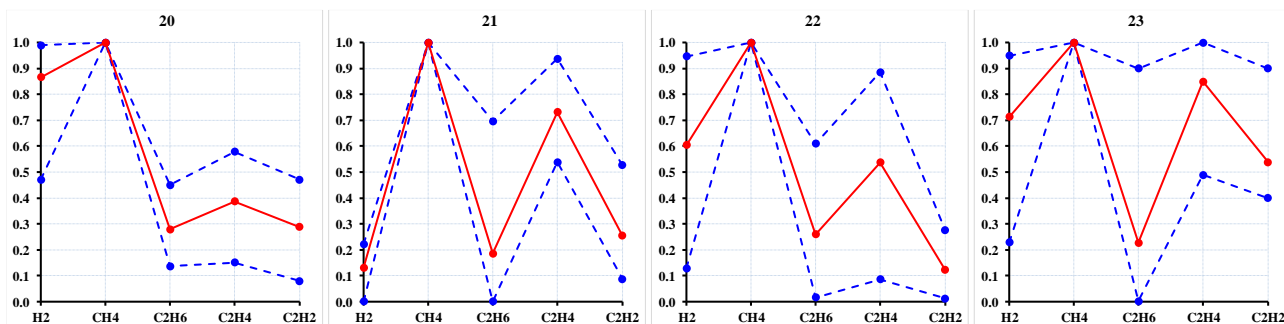


Рисунок 4 – Номограми середньотемпературних перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності: 20 – іскрові розряди; 21 і 22 – розряди; 23 – дугові розряди

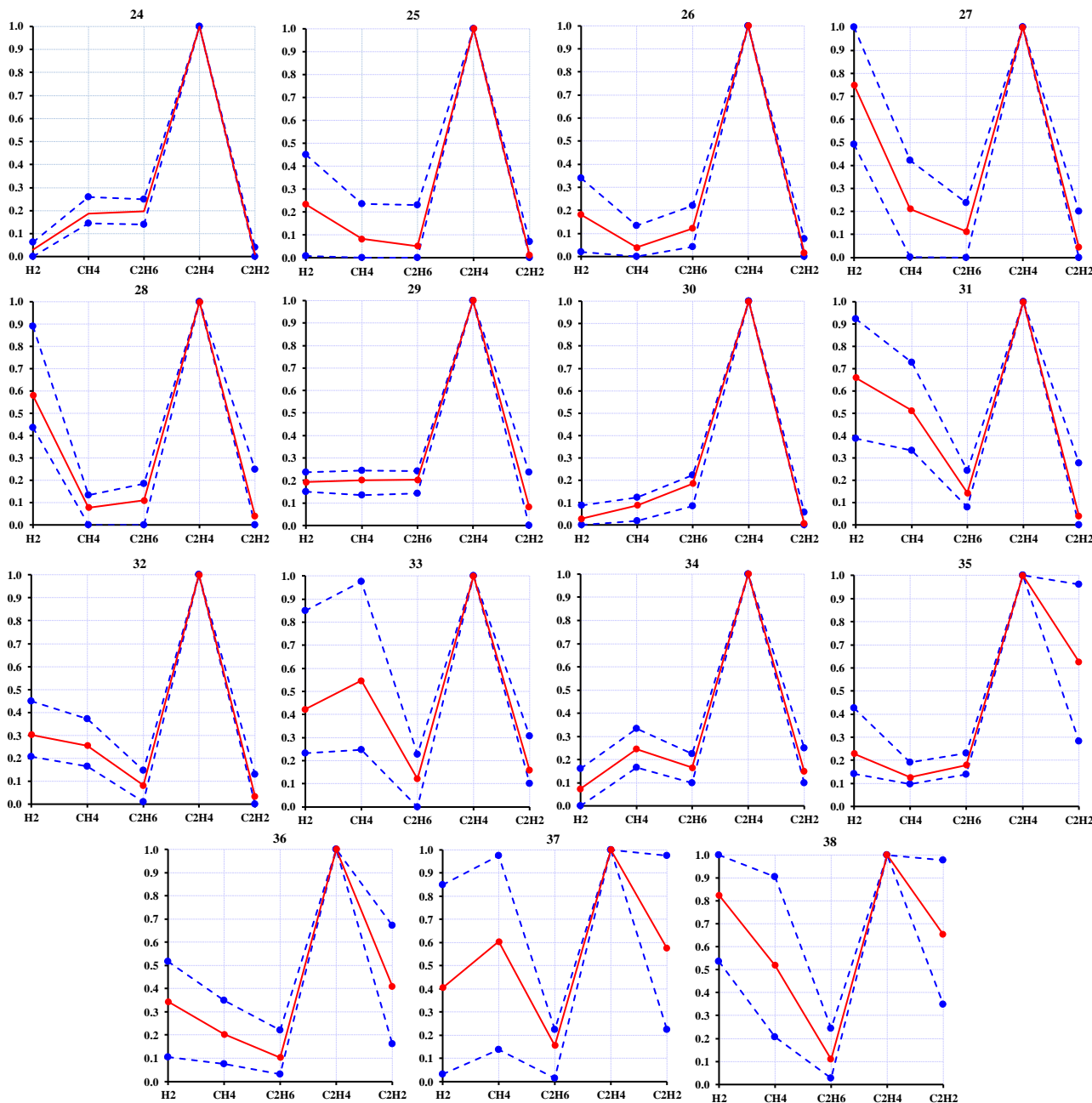


Рисунок 5 – Номограми високотемпературних перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності: 24 – CR; 25–28 – іскрові розряди; 29–34 – розряди; 35–38 – дугові розряди

Порівняльний аналіз достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, з використанням норм і критеріїв, що регламентуються відомими стандартами і методиками. Для оцінки достовірності існуючих методів для розпізнавання типу дефекту за результатами АРГ, для кожного масиву з однорідними значеннями критеріїв виконувалася діагностика з використанням значень діагностичних критеріїв, рекомендованих відомими стандартами і авторськими методиками. Використовуючи підхід, наведений в [14–22], в процесі аналізу визначалася статистика правильних, частково правильних та помилкових діагнозів, а також відмов від розпізнавання. Оскільки,

в силу різної швидкості розвитку електричних і термічних дефектів, наслідки прийняття рішення про наявність термічного дефекту замість комбінованого відрізняються від наслідків прийняття рішення про наявність електричного дефекту замість комбінованого, то до помилкових діагнозів були віднесені діагнози про наявність термічного дефекту, а до частково правильних – електричного дефекту. Результати аналізу наведені в табл. 3. Як і в [14–22], у стовпці 1 у чисельнику наведено відсоток правильних діагнозів, а у знаменнику – частково правильних діагнозів. У чисельнику стовпця 2 наведено відсоток помилкових діагнозів, а у знаменнику – відмов від розпізнавання.

Таблиця 3 – Результати порівняльного аналізу достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, з використанням норм і критеріїв, що регламентуються діючими стандартами і методиками

Метод, стандарт	Перегрів у різних діапазонах температур, що супроводжуються								Σ	
	ЧР		Іскровими розрядами		Розрядами		Дуговими розрядами			
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
IEC 60599 [8]	0	33	0	0	0	21	0	0	0	14
	2	64	0	100	0	79	17	83	4	82
СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 (Україна) [31]	0	30	1	2	0	31	0	7	0	19
	2	68	28	69	14	55	11	82	14	67
Метод Дорненбурга [24]	0	17	0	1	0	13	0	1	0	8
	0	83	14	85	12	75	12	87	11	81
Метод Роджерса [9]	2	14	1	12	1	20	0	18	1	17
	0	84	5	83	6	73	31	50	11	72
Трикутник Дюваля 1 [33]	1	83	8	89	19	72	34	18	17	65
	16	0	3	0	8	0	48	0	18	0
Комбінований п'ятикутник Дюваля [27]	0	100	0	59	0	94	0	25	0	71
	0	0	41	0	6	0	75	0	29	0
Метод номограм [26]	31	16	0	0	11	0	32	0	17	3
	0	53	0	100	0	89	0	68	0	80
Метод ETRA [32]	11	89	46	36	33	42	1	28	25	46
	0	0	11	8	19	6	71	0	26	4
Метод MSS [29]	0	47	5	16	11	47	8	14	7	32
	4	49	8	71	4	38	20	58	8	52
Метод 2 графічних форм [35]	0	89	0	72	0	82	0	10	0	65
	11	0	28	0	18	0	90	0	35	0
Квадрат 4 газів [36]	0	84	0	62	0	89	0	19	0	66
	14	2	38	0	11	0	81	0	34	0
Комбінація 4 газових відношень [37]	0	79	0	94	0	95	0	64	0	85
	21	0	6	0	5	0	36	0	15	0
Трикутник Гауда [34]	0	96	2	74	7	62	31	5	10	57
	4	0	24	0	31	0	64	0	32	0
Метод 3 відношень [30]	0	95	0	78	0	68	0	38	0	68
	4	1	22	0	29	2	62	0	31	1
Комбінація 3 газових відношень [37]	0	90	0	67	0	84	0	26	0	68
	10	0	33	0	16	1	72	2	32	1
4 газових відношення [38]	0	68	0	39	0	50	0	4	0	40
	4	28	9	52	1	49	33	63	11	49
П'ятикутник Мансура [39]	0	80	0	96	0	90	0	79	0	87
	20	0	4	0	10	0	21	0	13	0

Як видно із таблиці, серед 6 методів, які дозволяють розпізнавати дефекти комбінованого типу, найбільшу достовірність розпізнавання забезпечують графічні методи – квадрат ETRA [32] (24,6 %), трикутник Дюваля 1 [33] (17 %) та метод номограм [26] (16,8 %). Причому метод номограм не дозволяє розпізнавати лише перегриви у різних діапазонах температур, що супроводжуються іскровими розрядами, оскільки для цього типу дефекту, як видно з рис. 1, даним методом не регламентований образ дефекту (номограма). А от єдиний аналітичний метод розпізнавання – метод 3 відношень [30] – не зміг поставити жодного правильного діагнозу.

Серед усіх розглянутих методів достовірність діагностування частково правильних діагнозів (тобто були розпізнані дефекти електричного типу) дещо вища, проте не перевищує 35,5 % (метод 2 графічних форм). Найбільша кількість помилкових діагнозів була отримана при використанні п'ятикутника Мансура (87,3 %), комбінації 4 газових відношень (85,1 %) та комбінованого п'ятикутника Дюваля (71,3 %). А от найбільша кількість відмов від розпізнавання зафіксована при використанні значень відношень газів, що регламентовані ІЕС 60599 (82 %) та національним стандартом України (66,7 %), а також методами Дорненбурга (71,1 %), Роджерса (71,8 %), номограм (70,1 %) та MSS (51,8 %).

У той же час, якщо розглянути результати порівняльного аналізу достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, але провести градацію за температурою перегрівів, то отримаємо наступні результати:

- низькотемпературні перегриви – найкращу достовірність розпізнавання забезпечують метод номограм (15,6 %) та трикутник Дюваля 1 (9,4 %). Найбільша кількість частково правильних діагнозів отримана при використанні трикутника Гауда та методу 3 відношень (по 55 %), а також 2 графічних форм (46,3 %). Найбільша кількість помилкових діагнозів зафіксована при використанні комбінованого п'ятикутника Дюваля (90 %), квадрату ETRA (89,4 %) та трикутника Дюваля 1 (76,3 %). Методи Дорненбурга (90 %), ІЕС 60599 (87,5 %), Роджерса та номограм (по 84,4 %) забезпечили найбільшу кількість відмов від розпізнавання.

- середньотемпературні перегриви – найкращу достовірність розпізнавання забезпечують трикутник Дюваля 1 (44,2 %), трикутник Гауда (21,2 %) та метод номограм (19,2 %). Найбільша кількість частково правильних діагнозів отримана при використанні трикутника Гауда та національного стандарту України (по 48,1 %), методу Дорненбурга та квадрату ETRA (по 46,2 %) та трикутника Дюваля 1 (42,3 %). Найбільша кількість помилкових діагнозів зафіксована при використанні п'ятикутника Мансура (100 %), комбінованого п'ятикутника Дюваля (94,2 %) та комбінації 4 газових відношень (92,3 %). ІЕС 60599 (100 %) та метод номограм (80,8 %) забезпечили найбільшу кількість відмов від розпізнавання.

- високотемпературні перегриви – найкращу достовірність розпізнавання забезпечують квадрат ETRA (44,4 %) та метод номограм (40,9 %). Найбільша кількість частково правильних діагнозів отримана при використанні комбінованого п'ятикутника Дюваля (44,8 %), квадрату ETRA (37,8 %) та квадрату 4 газів (35,1 %). Найбільша кількість помилкових діагнозів зафіксована при використанні п'ятикутника Мансура (96,1 %), комбінації 4 газових відношень (91,1 %) та методу 3 відношень (83,8 %). Методи Дорненбурга (81,1 %), ІЕС 60599 (74,9 %) та національний стандарт України (71,8 %) забезпечили найбільшу кількість відмов від розпізнавання.

Підвищити достовірність розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, можна за допомогою значень відношень газів для розпізнавання комбінованих дефектів, які були регламентовані ще радянським стандартом РД 34.46.302-89 [40] – $C_2H_2/C_2H_4 \geq 0,1$ і $CH_4/H_2 > 0,5$ або $C_2H_2/C_2H_4 < 0,1$ і $CH_4/H_2 < 0,5$. Використання цих значень відношень газів разом зі значеннями, що регламентовані ІЕС 60599, дозволить розпізнати перегриви у різних діапазонах температур, що супроводжуються іскровими розрядами у 67,3 %, а перегриви у різних діапазонах температур, що супроводжуються дуговими розрядами у 68,8 %. Також, така комбінація дозволить розпізнати низькотемпературні перегриви, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, у 28,1 % усіх випадків, середньотемпературні – у 94,2 %, а високотемпературні – у 47,5 %. Сумарний результат правильного діагностування перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності при використанні такого підходу (використання значень відношень газів для розпізнавання комбінованих дефектів, які були регламентовані ще радянським стандартом [40], разом зі значеннями, що регламентовані ІЕС 60599 [8]) складає 46,1 % усіх випадків. На сьогодні, такий підхід використовується у національному стандарті Російської Федерації.

Висновки. У роботі наведено результати комплексного аналізу значень відношень газів, відсоткового вмісту газів та графічних областей дефектів для 471 трансформатора, у яких були виявлені перегриви у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. Аналіз значень діагностичних критеріїв для даних трансформаторів дозволив сформулювати 38 масивів даних з близькими значеннями діагностичних критеріїв, які відповідають перегрівам у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності.

Наведені у табл. 1 та 2 значення діагностичних критеріїв, а також номограми дефектів (рис. 3–5) показують, що отримані 38 масивів даних відрізняються як різним відсотковим вмістом газів і значеннями відношень газів, так і номограмами дефектів, незважаючи на певну схожість деяких

номограм між собою. Аналіз отриманих значень відношень газів (табл. 2) показав, що можна легко ідентифікувати температуру перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності. В той же час, ідентифікація енергії розрядів викликає складнощі.

Аналіз графічних областей дефектів (рис. 3–5) і їх порівняння з еталонними номограмами (рис. 1) дозволив встановити, що еталонним відповідають лише 4 (№ 3, 23, 33 і 37), а 34 номограми отримані вперше.

Порівняльний аналіз достовірності розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, з використанням норм і критеріїв, що регламентуються відомими стандартами і методиками дозволив встановити методи, які найкраще дозволяють правильно ідентифікувати такі дефекти – квадрат ЕТРА [32], трикутник Дюваля 1 [33] та метод номограм [26]. Причому, якщо провести градацію дефектів за температурою перегрівів, то при розпізнаванні низькотемпературних перегрівів, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності найкраще показав себе метод номограм, при розпізнаванні середньотемпературних перегрівів – трикутник Дюваля 1, а при розпізнаванні високотемпературних перегрівів – квадрат ЕТРА. Підвищити достовірність розпізнавання можна за допомогою значень відношень газів для розпізнавання комбінованих дефектів, які були регламентовані ще радянським стандартом РД 34.46.302-89 [40] при використанні їх разом зі значеннями відношень газів, регламентованих ІЕС 60599. На сьогодні, такий підхід використовується у національному стандарті Російської Федерації.

Наведені в роботі значення діапазонів відсоткового вмісту газів, значень відношень газів, а також побудовані графічні області та номограми, що відповідають перегрівам в діапазоні різних температур, що супроводжуються розрядами з різним ступенем інтенсивності, можна розглядати як діагностичну схему, що дозволяє розпізнавати тип дефекту з одночасним використанням трьох критеріїв. Використання такого підходу дозволить суттєво підвищити експлуатаційну надійність силових трансформаторів та продовжити їх ресурс.

Список літератури

- Kulyk O. S. Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2020. № 1. С. 15–25. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.03>.
- Ahmedi S.-A., Sanaye-Pasand M. A Robust Multi-Layer Framework for Online Condition Assessment of Power Transformers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2021. Vol. 37, no. 2. P. 947–954. DOI: <https://doi.org/10.1109/tpwr.2021.3074545>.
- Poonnoy N., Suwanasri C., Suwanasri T. Failure Index and Fault Determination of Power Transformer Using Fuzzy Logic and Dissolved Gas Analysis. *International Electrical Engineering Transactions*. 2019. Vol. 5, no. 2. P. 39–43.
- Fan J., Wang F., Sun Q. et al. Hybrid RVM–ANFIS algorithm for transformer fault diagnosis. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2017. Vol. 11, no. 14. P. 3637–3643. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0547>.
- Huang Z., Zhou J., Huang W. et al. Multiple Classifiers Based Information Fusion for Power Transformer Fault Diagnosis. *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Wuhan, China, 30 October – 1 November 2020. P. 2971–2975. DOI: <https://doi.org/10.1109/ei2020.9346733>.
- Wang L., Littler T., Liu X. Gaussian Process Multi-Class Classification for Transformer Fault Diagnosis Using Dissolved Gas Analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2021. Vol. 28, no. 5. P. 1703–1712. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2021.009470>.
- Kherif O., Benmahamed Y., Tegar M., Boubakeur A., Ghoneim S. S. M. Accuracy Improvement of Power Transformer Faults Diagnostic Using KNN Classifier With Decision Tree Principle. *IEEE Access*. 2021. Vol. 9. P. 81693–81701. DOI: <https://doi.org/10.1109/access.2021.3086135>.
- IEC 60599:2015. Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis. Geneva, Switzerland: International Electrotechnical Commission, 2015. 78 p.
- Rogers R. R. IEEE and IEC Codes to Interpret Incipient faults in Transformers, Using Gas in Oil Analysis. *IEEE Transactions on Electrical Insulation*. 1978. Vol. EI-13, no. 5. P. 349–354. DOI: <https://doi.org/10.1109/TEI.1978.298141>.
- Abu-Siada A., Hmood S., Islam S. A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20, no. 6. P. 2343–2349. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6678888>.
- Shutenko O., Kulyk O. Comparative Analysis of the Defect Type Recognition Reliability in High-Voltage Power Transformers Using Different Methods of DGA Results Interpretation. *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*. Kremenchuk, Ukraine, 2020. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/PAEP49887.2020.9240911>.
- Шутенко О. В. Анализ содержания газов в маслонаполненном оборудовании с дефектами электрического типа. *Problemele Energeticii Regionale*. 2018. № 3(38). С. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2222331>.
- Shutenko O., Yakovenko I. Analysis of Gas Content in High Voltage Equipment With Partial Discharges. *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*. Kharkiv, Ukraine, 2018. P. 347–352. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEPS.2018.8559534>.
- Shutenko O., Kulyk O. Analysis of Gas Content in Oil-Filled Equipment with Low Energy Density Discharges. *International Journal on Electrical Engineering & Informatics*. 2020. Vol. 12, no. 2. P. 258–277. DOI: <https://doi.org/10.15676/ijeei.2020.12.2.6>.
- Shutenko O., Kulyk O. Recognition of low-temperature overheating in power transformers by dissolved gas analysis. *Electrical Engineering*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01465-5>.
- Shutenko O., Kulyk O. Recognition of Mid-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*. 2021. P. 401–406. DOI: <https://doi.org/10.1109/KhPIWeek53812.2021.9570059>.
- Shutenko O., Kulyk O. Recognition of High-Temperature Overheating in High-Voltage Power Transformers by Dissolved Gas Analysis. *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*. 2021. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEES52427.2021.9598575>.
- Кулик О. С. Розпізнавання перегрівів у різних діапазонах температур у високовольтному маслонаповненому обладнанні за результатами аналізу розчинених у маслі газів. *Вісник Національного технічного університету «ХПІ». Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність*. 2021. № 2(3). С. 102–113. DOI: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.03>.
- Шутенко О., Кулик А. Распознавание перегревов, которые сопровождаются разрядами с высокой плотностью энергии, по результатам анализа растворенных в масле газов. *Energy. Series: «Modern problems of power engineering and ways of solving them»*. 2020. № 4(96). С. 82–87.
- Shutenko O., Kulyk O. Recognition of discharges that are accompanied by low-temperature overheating based on the analysis of gases dissolved in the oil of high-voltage transformers. *Energy saving. Power engineering. Energy audit*. 2021. No. 3-4(157-158). P. 20–33. DOI: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2021.03.02>.

21. Shutenko O., Kulyk O. Combined Defects Recognition in the Low and Medium Temperature Range by Results of Dissolved Gas Analysis. *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, 5–10 October 2020. Kharkiv, 2020. P. 65–70. DOI: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250131>.
22. Shutenko O., Kulyk O. Recognition of Overheating with Temperatures of 150–300°C by Analysis of Dissolved Gases in Oil. *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, 7–11 September 2020. Istanbul, 2020. P. 71–76. DOI: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263145>.
23. Möllmann A., Pahlavanpour B. New guideline for interpretation of dissolved gas analysis in oil filled transformers. *Electra*. 1999. No. 186. P. 31–51.
24. Dörnenburg E., Strittmater W. Monitoring Oil-Cooled Transformers by Gas Analysis. *Brown Boveri Review*. 1974. Vol. 61. P. 238–274.
25. IEEE Std C57.104–2019. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers. Replaces IEEE Std C57.104–2008 ; effective from 2019-11-01. Official edition. Piscataway, NJ, USA : Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2019. 91 p. DOI: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8890040>.
26. Kawamura T., Kawada N., Ando K., Yamaoka M., Maeda T., Takatsu T. Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers. *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Paris, 27 April – 4 September 1986.
27. Cheim L., Duval M., Haider S. Combined Duval Pentagons: A Simplified Approach. *Energies*. 2020. Vol. 13, no. 11. P. 2859. DOI: <https://doi.org/10.3390/en13112859>.
28. Gouda O., El-Hoshy S., El-Tamaly H. Proposed heptagon graph for DGA interpretation of oil transformers. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12, no. 2. P. 490–498. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0826>.
29. Müller R., Schliesing H., Soldner K. Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse. *Elektrizitätswirtschaft*. 1977. No. 76. P. 345–349.
30. Gouda O. E., El-Hoshy S. H., E.L.-Tamaly H. H. Proposed three ratios technique for the interpretation of mineral oil transformers based dissolved gas analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2018. Vol. 12, no. 11. P. 2650–2661. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1927>.
31. 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. Методичні вказівки. Київ: Міністерство палива та енергетики України, 2007. 91 с.
32. Guideline for the refurbishment of Electric Power Transformers. *Electrical Cooperative Research Association*. 2009. Vol. 65, no. 1.
33. Duval M. The Duval Triangle for load tap changers non-mineral oils and low temperature faults in transformers. *IEEE Electrical Insulation Magazine*. 2008. Vol. 24, no. 6. P. 22–29. DOI: <https://doi.org/10.1109/MEI.2008.4665347>.
34. Gouda O. E., El-Hoshy S. H., E.L.-Tamaly H. H. Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2019. Vol. 13, no. 12. P. 2299–2310. DOI: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6168>.
35. Emarra M. M., Peppas G. D., Gonos I. F. Two Graphical Shapes Based on DGA for Power Transformer Fault Types Discrimination. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2021. Vol. 28, no. 3. P. 981–987. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2021.009415>.
36. Lee S.-j., Kim Y.-w., Seo H.-d. et al. New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 2: application of relative content of fault gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20, no. 2. P. 691–696. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508774>.
37. Kim S.-w., Kim S.-j., Seo H.-d. et al. New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 1: application of gas-ratio combinations. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2013. Vol. 20, no. 2. P. 685–690. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508773>.
38. Internal defect diagnosis method of an oil immersed transformer through a dissolved gas composition ratio: patent 1020130074674 South Korea: G01R 31/02, G01R 31/12; no. 1020110142844 ; applied on 26.12.2011 ; published on 04.07.2013.
39. Mansour D.-E. A. Development of a new graphical technique for dissolved gas analysis in power transformers based on the five combustible gases. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*. 2015. Vol. 22, no. 5. P. 2507–2512. DOI: <https://doi.org/10.1109/tdei.2015.004999>.
40. РД 34.46.302-89. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. Москва: СПО Союзтехэнерго, 1989.
41. Shutenko O., Yakovenko I. Fault diagnosis of power transformer using method of graphic images. *2017 IEEE International Young Scientists' Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, Lviv, Ukraine, 17–20 October 2017. Lviv, 2017. P. 66–69. DOI: <https://doi.org/10.1109/ysf.2017.8126594>.

References

- O. S. Kulyk, “Analysis of the diagnostic criteria used to defect type recognition based on the results of analysis of gases dissolved in oil,” *Bulletin of the National Technical University “KhPI”. Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, 1, pp. 15–25, Dec. 2020, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2020.01.03>.
- S.-A. Ahmadi and M. Sanaye-Pasand, “A robust multi-layer framework for online condition assessment of power transformers,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 37, no. 2, pp. 947–954, Apr. 2022, doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2021.3074545>.
- N. Poonnoy, C. Suwanasri, and T. Suwanasri, “Failure index and fault determination of power transformer using fuzzy logic and dissolved gas analysis,” *International Electrical Engineering Transactions*, vol. 5, no. 2, pp. 39–43, 2019.
- J. Fan, F. Wang, Q. Sun, F. Bin, F. Liang, and X. Xiao, “Hybrid RVM–ANFIS algorithm for transformer fault diagnosis,” *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 11, no. 14, pp. 3637–3643, Sep. 2017, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0547>.
- Z. Huang, J. Zhou, W. Huang, Y. Liu, G. Zhu, and K. Zhang, “Multiple Classifiers Based Information Fusion for Power Transformer Fault Diagnosis,” in *2020 IEEE 4th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, Wuhan, China, Oct. 30–Nov. 1, 2020, pp. 2971–2975, doi: <https://doi.org/10.1109/EI250167.2020.9346733>.
- L. Wang, T. Littler, and X. Liu, “Gaussian process multi-class classification for transformer fault diagnosis using dissolved gas analysis,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 5, pp. 1703–1712, Oct. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2021.009470>.
- O. Kherif, Y. Benmahamed, M. Tegar, A. Boubakeur, and S. S. M. Ghoneim, “Accuracy improvement of power transformer faults diagnostic using KNN classifier with decision tree principle,” *IEEE Access*, vol. 9, pp. 81693–81701, 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3086135>.
- Mineral oil-filled electrical equipment in service – Guidance on the interpretation of dissolved and free gases analysis*, IEC 60599:2015, 2015.
- R. R. Rogers, “IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers, using gas in oil analysis,” *IEEE Transactions on Electrical Insulation*, vol. EI-13, no. 5, pp. 349–354, Oct. 1978, doi: <https://doi.org/10.1109/TEI.1978.298141>.
- A. Abu-Siada, S. Hmood, and S. Islam, “A new fuzzy logic approach for consistent interpretation of dissolved gas-in-oil analysis,” *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 6, pp. 2343–2349, Dec. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2013.6678888>.
- O. Shutenko and O. Kulyk, “Comparative analysis of the defect type recognition reliability in high-voltage power transformers using different methods of DGA results interpretation,” in *2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP)*, Kremenchuk, Ukraine, Sep. 21–25, 2020, pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/paep49887.2020.9240911>.
- O. V. Shutenko, “Analysis of the content of gases in oil-filled equipment with electrical defects,” *Problemele Energeticii Regionale*, no. 3(38), pp. 1–16, 2018, doi: <https://doi.org/10.5281/zenodo.2222331>. (in Russian)
- O. Shutenko and I. Yakovenko, “Analysis of gas content in high voltage equipment with partial discharges,” in *2018 IEEE 3rd International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Kharkiv, Sep. 10–14, 2018, pp. 347–352, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps.2018.8559534>.

14. O. Shutenko and O. Kulyk, "Analysis of gas content in oil-filled equipment with low energy density discharges," *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol. 12, no. 2, pp. 258–277, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.15676/ijeei.2020.12.2.6>.
15. O. Shutenko and O. Kulyk, "Recognition of low-temperature overheating in power transformers by dissolved gas analysis," *Electrical Engineering*, Jan. 2022, doi: <https://doi.org/10.1007/s00202-021-01465-5>.
16. O. Shutenko and O. Kulyk, "Recognition of mid-temperature overheating in high-voltage power transformers by dissolved gas analysis," in *2021 IEEE 2nd KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Sep. 13–17, 2021, pp. 401–406, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek53812.2021.9570059>.
17. O. Shutenko and O. Kulyk, "Recognition of high-temperature overheating in high-voltage power transformers by dissolved gas analysis," in *2021 IEEE International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, Kremenchuk, Ukraine, Sep. 21–24, 2021, pp. 1–6, doi: <https://doi.org/10.1109/mees52427.2021.9598575>.
18. O. Kulyk, "Recognition of overheating in different temperature ranges in high-voltage oil-filled equipment by the dissolved gas analysis," *Bulletin of the National Technical University "KhPI". Series: Energy: Reliability and Energy Efficiency*, no. 2(3), pp. 102–113, 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2224-0349.2021.02.03>. (in Ukrainian)
19. O. Shutenko and O. Kulyk, "Recognition of overheating accompanied by high energy density discharges based on analysis of gases dissolved in oil," *Energy. Series: "Modern Problems of Power Engineering and Ways of Solving Them"*, no. 4(96), pp. 82–87, 2020. (in Russian)
20. O. Shutenko and O. Kulyk, "Recognition of discharges that are accompanied by low-temperature overheating based on the analysis of gases dissolved in the oil of high-voltage transformers," *Energy Saving. Power Engineering. Energy Audit*, no. 3–4 (157–158), pp. 20–33, Sep. 2021, doi: <https://doi.org/10.20998/2313-8890.2021.03.02>.
21. O. Shutenko and O. Kulyk, "Combined defects recognition in the low and medium temperature range by results of dissolved gas analysis," in *2020 IEEE KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek)*, Kharkiv, Ukraine, Oct. 5–10, 2020, pp. 65–70, doi: <https://doi.org/10.1109/khpiweek51551.2020.9250131>.
22. O. Shutenko and O. Kulyk, "Recognition of overheating with temperatures of 150–300°C by analysis of dissolved gases in oil," in *2020 IEEE 4th International Conference on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS)*, Istanbul, Turkey, Sep. 7–11, 2020, pp. 71–76, doi: <https://doi.org/10.1109/ieps51250.2020.9263145>.
23. A. Möllmann and B. Pahlavanpour, "New guideline for interpretation of dissolved gas analysis in oil filled transformers," *Electra*, no. 186, pp. 31–51, 1999.
24. E. Dörnenburg and W. Strittmater, "Monitoring oil-cooled transformers by gas analysis," *Brown Boveri Review*, vol. 61, pp. 238–274, 1974.
25. *IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Mineral Oil-Immersed Transformers*, IEEE Std C57.104–2019, 2019. doi: <https://doi.org/10.1109/IEEESTD.2019.8890040>.
26. T. Kawamura, N. Kawada, K. Ando, M. Yamaoka, T. Maeda, and T. Takatsu, "Analyzing gases dissolved in oil and its application to maintenance of transformers," in *International Conference on Large High Voltage Electric Systems*, Paris, Apr. 27–Sep. 4, 1986.
27. L. Cheim, M. Duval, and S. Haider, "Combined Duval Pentagons: A Simplified Approach," *Energies*, vol. 13, no. 11, p. 2859, Jun. 2020, doi: <https://doi.org/10.3390/en13112859>.
28. O. E. Gouda, S. H. El-Hoshy, and H. H. El-Tamaly, "Proposed heptagon graph for DGA interpretation of oil transformers," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 2, pp. 490–498, Jan. 2018, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.0826>.
29. R. Müller, H. Schliesing, and K. Soldner, "Die Beurteilung des Betriebszustandes von Transformatoren durch Gasanalyse," *Elektrizitätswirtschaft*, no. 76, pp. 345–349, 1977. (in German)
30. O. E. Gouda, S. H. El-Hoshy, and H. H. E.L.-Tamaly, "Proposed three ratios technique for the interpretation of mineral oil transformers based dissolved gas analysis," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 12, no. 11, pp. 2650–2661, Jun. 2018, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2017.1927>.
31. *Diahnostyka Maslonapovnenoho Transformatornoho Obladnannia Za Rezultatamy Khromatografichnoho Analizu Vilnykh Haziv, Vidibranykh Iz Hazovoho Rele, I Haziv, Rozchynenykh U Izoliatsinomu Masli. Metodychni Vkazivky [Diagnosis of Oil-Filled Transformer Equipment by Chromatographic Analysis of Free Gases Sampled From the Gas Relay and Gases Dissolved in the Insulating Oil. Methodological Guidelines]*, SOU-N EE 46.501:2006, Naukovo-inzhenernyj centr "ZTZ-Servis" [Scientific and engineering centre "ZTZ-service"], Kyiv, 2007.
32. "Guideline for the refurbishment of electric power transformers," *Electrical Cooperative Research Association*, vol. 65, no. 1, 2009. (in Japanese)
33. M. Duval, "The duval triangle for load tap changers, non-mineral oils and low temperature faults in transformers," *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 24, no. 6, pp. 22–29, Nov. 2008, doi: <https://doi.org/10.1109/mei.2008.4665347>.
34. O. E. Gouda, S. H. El-Hoshy, and H. H. E.L.-Tamaly, "Condition assessment of power transformers based on dissolved gas analysis," *IET Generation, Transmission & Distribution*, vol. 13, no. 12, pp. 2299–2310, Jun. 2019, doi: <https://doi.org/10.1049/iet-gtd.2018.6168>.
35. M. M. Emara, G. D. Peppas, and I. F. Gonos, "Two graphical shapes based on DGA for power transformer fault types discrimination," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 28, no. 3, pp. 981–987, Jun. 2021, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2021.009415>.
36. S.-j. Lee, Y.-m. Kim, H.-d. Seo, J.-r. Jung, H.-j. Yang, and M. Duval, "New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 2: Application of relative content of fault gases," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 2, pp. 691–696, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508774>.
37. S.-w. Kim, S.-j. Kim, H.-d. Seo, J.-r. Jung, H.-j. Yang, and M. Duval, "New methods of DGA diagnosis using IEC TC 10 and related databases Part 1: Application of gas-ratio combinations," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 20, no. 2, pp. 685–690, Apr. 2013, doi: <https://doi.org/10.1109/tdei.2013.6508773>.
38. S.-J. Kim, H.-D. Seo, and S.-W. Kim, "Internal defect diagnosis method of an oil immersed transformer through a dissolved gas composition ratio," South Korean Patent 1020130074674, Jul. 4, 2013. (in Korean)
39. D.-E. A. Mansour, "Development of a new graphical technique for dissolved gas analysis in power transformers based on the five combustible gases," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 22, no. 5, pp. 2507–2512, Oct. 2015, doi: <https://doi.org/10.1109/TDEI.2015.004999>.
40. *Metodicheskie Ukazaniia Po Diagnostike Razvivaiushchikhsia Defektov Po Rezultatam Khromatograficheskogo Analiza Gazov, Rastvorenykh v Masle Silovykh Transformatorov [Guidelines for the Diagnosis of Developing Defects Based on the Results of Chromatographic Analysis of Gases Dissolved in the Oil of Power Transformers]*, RD 34.46.302-89, Vsesoiuznyy nauchno-issledovatel'skiy institut elektroenergetiki (VNIIE) [All-Union Electric Power Research Institute (VNIIE)], Moscow, 1989.
41. O. Shutenko and I. Yakovenko, "Fault diagnosis of power transformer using method of graphic images," in *2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering*, Lviv, Ukraine, 17–20 October 2017, pp. 66–69, doi: <https://doi.org/10.1109/YSF.2017.8126594>.

Надійшло (received) 06.06.2022

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Кулик Олексій Сергійович (Кулик Алексей Сергеевич, Oleksii Kulyk) – аспірант кафедри передачі електричної енергії, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2545-6314>; e-mail: oleksii.kulyk@iee.khpi.edu.ua.