

О. В. ШУТЕНКО, канд. техн. наук, доцент, НТУ «ХП»;
Д. М. БАКЛАЙ, аспірант, НТУ «ХП»

АНАЛІЗ КОРЕЛЯЦІЙНИХ ЗВ'ЯЗКІВ МІЖ ГАЗАМИ, РОЗЧИНЕНИМИ В МАСЛІ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ПРИ РІЗНИХ ТИПАХ ДЕФЕКТІВ

Досліджена тіснота кореляційного зв'язку між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів при різних типах дефектів. Установлена наявність значимого зв'язку як між газами характерними для даного типу дефекту, так і між супутніми газами. Показано, що кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою, зростає не тільки з ростом енергії, що виділяється при даному типі дефекту, але й від часу розвитку дефекту. Отримані результати є підставою для розробки статистичних моделей дефектів, які повинні адекватно враховувати як кількісну, так і якісну відмінність у вмісті газів в маслі при різних типах дефектів.

Ключові слова: хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів, тип дефекту, кореляція між газами, дуговий розряд, термічний перегрів, комбінований дефект.

Постановка проблеми. При визначенні граничних значень концентрацій розчинених у маслі газів за допомогою методів статистичних рішень, принципово важливим є адекватно оцінити значення параметрів законів розподілу газів для бездефектного й дефектного устаткування. Якщо, для бездефектного стану трансформаторів, значення концентрацій газів, а, отже, і параметри закону розподілу будуть в основному визначатися умовами експлуатації, сортом масел і конструктивними особливостями устаткування, то для дефектного устаткування принципово важливий облік типу прогнозованого дефекту. Подібного роду облік має на увазі не тільки кількісне, але і якісне співвідношення між отриманими розподілами концентрацій газів і їх дійсним вмістом у пробі масла для даного типу дефекту. Забезпечення якісної відповідності між розподілами концентрацій газів і їх вмістом у пробі масла для даного типу дефекту принципово не можливо без аналізу кореляційних зв'язків між газами при різних типах дефекту.

Аналіз публікацій. На цей час процеси газоутворення в трансформаторному маслі фундаментально досліджені й, знайшли широке відбиття у відкритих джерелах, наприклад в [1]. У роботах [2-5] наведені результати досліджень вмісту газів в маслі високовольтного устаткування з різними типами дефектів. Однак, більшість із наведених досліджень зводилося до оцінки рівнів концентрацій газів, їх процентного вмісту в пробі масла й аналізу значень відносин пар газів при різних рівнях енергетичних впливів. У роботі [6] виконані дослідження тісноти стохастичного зв'язку між газами, розчиненими в

© О. В. Шутенко, Д. М. Баклай, 2015

маслі бездефектних трансформаторів. У той же час питання, пов'язані з аналізом кореляційних зв'язків між газами в дефектних трансформаторах освітлені недостатньо, що й послужило приводом для написання даної статті.

Ціль статті – У статті приводяться результати аналізу тісноти кореляційного зв'язку між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів, при різних типах дефектів.

Метод вирішення. Основним завданням виконуваних досліджень є виявлення тих газів, які мають значимий статистичний зв'язок притому або іншому типу дефектів. Тобто виявити ті газу концентрації, яких змінюються закономірно й ті газу концентрації, яких змінюються не залежно від концентрацій інших газів при даному типі дефекту. У якості вихідних даних використовувалися значення концентрацій розчинених у маслі газів, по 215 трансформаторах, у яких за результатами експлуатаційних випробувань був виявлений дефект, і встановлено його тип.

Оцінка тісноти кореляційного зв'язку між двома газами виконувалася як:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \cdot \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

де r – коефіцієнт парної кореляції; x_i, y_i – поточні значення концентрацій газів; \bar{x}, \bar{y} – середні значення концентрацій газів; n – обсяг вибіркового значень.

Рішення про значимість кореляційного зв'язку між двома газами, ухвалювалося на основі порівняння розрахованого значення коефіцієнта парної кореляції з його критичним значенням, при заданому рівні довірчої ймовірності $\alpha = 0,05$ і при числі ступенів свободи $n - 2$ [7]. Зв'язок уважався значимим, якщо розрахункове значення коефіцієнта парної кореляції перевищувало відповідне критичне значення.

Однак коефіцієнт парної кореляції характеризує лише ступінь лінійного статистичного зв'язку між випадковими величинами й не може характеризувати зв'язок через моменти більш високого порядку. Інформацію про нелінійний зв'язок між випадковими величинами можна одержати, використовуючи значення емпіричного кореляційного відношення:

$$\hat{\eta}_{y/x} = \frac{\sum_{i=1}^n n_i \cdot (\bar{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^{n_j} (\tilde{y}_{ij} - \bar{y})^2}, \quad (2)$$

де n – обсяг вибірки; $\bar{y}_i = \frac{1}{n_i} \sum_{j=1}^{n_i} \tilde{y}_{ij}$ – умовне середнє, отримане для значень x_i ,

при $j = \overline{1, m_j}$; $\bar{y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^N \bar{y}_i$ – загальне середнє по всіх експериментальних точках;

\tilde{y}_{ij} – результати спостережень в i -тій експериментальній точці.

Розрахунки значень коефіцієнтів парної кореляції, а також прямого й зворотного кореляційного відносин виконувався за допомогою, розробленої на кафедрі «Передача електричної енергії» НТУ «ХП» програми «KORREL» [8]. Оскільки рішення про наявність або відсутність зв'язку між розчиненими в маслі газами, при використанні в якості критерію тісноти зв'язку значення коефіцієнта парної кореляції, збіглися з аналогічними рішеннями при використанні значень кореляційного відношення, то для скорочення обсягу матеріалу, у даній статті приводяться тільки значення коефіцієнтів парної кореляції.

Аналіз результатів. Для зручності аналізу результати розбиті на три групи. У першу групу входять значення коефіцієнтів парної кореляції між газами при дефектах електричного типу, у другу між газами при дефектах термічного типу, у третю між газами при комбінованих дефектах. Результати аналізу наведено в табл. 1-3. Жирним шрифтом виділені значення коефіцієнтів парної кореляції, які перевищують критичні.

Таблиця 1 – Значення коефіцієнтів парної кореляції в трансформаторах з дефектами електричного типу

Тип дефекту	Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂
Часткові розряди ρ _{крит} , 10, 0,95=0,576	H ₂	1,00	0,976	0,896	0,0152	-	0,970
	CH ₄	0,976	1,00	0,971	0,049	-	0,9997
	C ₂ H ₆	0,896	0,971	1,00	0,084	-	0,976
	C ₂ H ₄	0,0152	0,049	0,084	1,00	-	0,054
	C ₂ H ₂	-	-	-	-	1,00	-
	C ₂ H ₂	0,970	0,9997	0,976	0,054	-	1,00
Дуговий розряд ρ _{крит} , 9, 0,95=0,632	H ₂	1,00	0,726	0,539	0,408	0,915	0,820
	CH ₄	0,726	1,00	0,392	0,883	0,899	0,965
	C ₂ H ₆	0,539	0,392	1,00	0,468	0,605	0,586
	C ₂ H ₄	0,408	0,883	0,468	1,00	0,692	0,840
	C ₂ H ₂	0,915	0,899	0,605	0,692	1,00	0,972
	C ₂ H ₂	0,820	0,965	0,586	0,840	0,972	1,00
Повзучий розряд ρ _{крит} , 8, 0,95=0,602	H ₂	1,00	0,885	0,903	0,894	0,815	0,909
	CH ₄	0,885	1,00	0,887	0,969	0,839	0,975
	C ₂ H ₆	0,903	0,887	1,00	0,832	0,797	0,891
	C ₂ H ₄	0,894	0,969	0,832	1,00	0,855	0,976
	C ₂ H ₂	0,815	0,839	0,797	0,855	1,00	0,932
	C ₂ H ₂	0,909	0,975	0,891	0,976	0,932	1,00

Таблиця 2 – Значення коефіцієнтів парної кореляції в трансформаторах з дефектами термічного типу

Тип дефекту	Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ S
Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C) ρ _{крит.} , 14, 0,95=0,497	H ₂	1,00	-0,619	-0,582	-0,584	0,398	-0,602
	CH ₄	-0,619	1,00	0,9986	0,9990	-0,023	0,9998
	C ₂ H ₆	-0,582	0,9986	1,00	0,9997	0,0212	0,9994
	C ₂ H ₄	-0,584	0,9990	0,9997	1,00	0,021	0,9997
	C ₂ H ₂	0,398	-0,023	0,0212	0,021	1,00	-0,0019
	C ₂ H ₂ S	-0,602	0,9998	0,9994	0,9997	-0,0019	1,00
Високотемпературний перегрів (вище 700°C) ρ _{крит.} , 52, 0,95=0,273	H ₂	1,00	0,108	0,012	0,324	-0,179	0,240
	CH ₄	0,108	1,00	0,946	0,899	-0,078	0,954
	C ₂ H ₆	0,012	0,946	1,00	0,922	-0,069	0,960
	C ₂ H ₄	0,324	0,899	0,922	1,00	-0,136	0,989
	C ₂ H ₂	-0,179	-0,078	-0,069	-0,136	1,00	-0,111
	C ₂ H ₂ S	0,240	0,954	0,960	0,989	-0,111	1,00

Таблиця 3 – Значення коефіцієнтів парної кореляції в трансформаторах з комбінованими дефектами

Тип дефекту	Газ	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₂ S
Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C), що супроводжується розрядами ρ _{крит.} , 10, 0,95=0,576	H ₂	1,00	0,557	0,899	0,795	0,341	0,740
	CH ₄	0,557	1,00	0,527	0,783	-0,106	0,945
	C ₂ H ₆	0,899	0,527	1,00	0,923	0,675	0,774
	C ₂ H ₄	0,795	0,783	0,923	1,00	0,515	0,941
	C ₂ H ₂	0,341	-0,106	0,675	0,515	1,00	0,200
	C ₂ H ₂ S	0,740	0,945	0,774	0,941	0,200	1,00
Високотемпературний перегрів (вище 700°C) і розряд ρ _{крит.} , 14, 0,95=0,497	H ₂	1,00	0,999	0,943	0,931	0,185	0,949
	CH ₄	0,999	1,00	0,939	0,925	0,165	0,944
	C ₂ H ₆	0,943	0,939	1,00	0,995	0,236	0,996
	C ₂ H ₄	0,931	0,925	0,995	1,00	0,261	0,998
	C ₂ H ₂	0,185	0,165	0,236	0,261	1,00	0,274
Високотемпературний перегрів (вище 700°C) перехідний у дуговий розряд ρ _{крит.} , 22, 0,95=0,423	H ₂	1,00	0,985	0,979	0,978	0,988	0,980
	CH ₄	0,985	1,00	0,999	0,998	0,988	0,9991
	C ₂ H ₆	0,979	0,999	1,00	0,9997	0,983	0,99991
	C ₂ H ₄	0,978	0,998	0,9997	1,00	0,982	0,99995
	C ₂ H ₂	0,988	0,988	0,983	0,982	1,00	0,984
C ₂ H ₂ S	0,980	0,9991	0,99991	0,99995	0,984	1,00	

Електричні дефекти. У даній роботі досліджувався кореляційний зв'язок між газами при часткових, дугових і повзучих розрядах. Проаналізуємо кореляцію між газами для кожного типу дефекту.

Часткові розряди. Часткові розряди супроводжуються виділенням водню (H₂), який є ключовим газом для даного типу дефекту й у значно меншій кількості метану (CH₄). Етан і етилен (C₂H₆ і C₂H₄) присутні в дуже незначній

кількості, на рівні аналітичного порога їх розпізнавання (0,0015 % об.). Концентрації ацетилену (C_2H_2) не перевищують аналітичного порога розпізнавання, а для слабких розрядів межі виявлення даного газу, хроматографом (приблизно, 0,00005 % об.).

Збільшення потужності часткових розрядів супроводжується збільшенням відносної концентрації C_2H_6 і C_2H_4 і утворенням C_2H_2 . Як видно з табл. 1, при розвитку часткових розрядів, значимий кореляційний зв'язок виявлений між H_2 , CH_4 і C_2H_6 . Найбільшу тісноту зв'язку із сумою газів вуглеводневого ряду має CH_4 , що свідчить про те, що серед усіх газів вуглеводневого ряду максимальну концентрацію має метан.

Дугові розряди. Стійкий дуговий розряд супроводжується виділенням великої кількості енергії за короткий проміжок часу. Характерними газами для дугового розряду є H_2 і C_2H_2 , крім того виділяються CH_4 і C_2H_4 з довільним змістом і незначний зміст C_2H_6 . Аналізуючи дані табл. 1 легко побачити, що при дугових розрядах водень має значимий кореляційний зв'язок з метаном і ацетиленом, метан з воднем, етиленом і ацетиленом, етан тільки з ацетиленом, а етилен з метаном і етиленом. Ацетилен має значиму кореляцію з усіма газами. При цьому саме ацетилен має найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду, що говорить про те, що серед газів вуглеводневого ряду, максимальна концентрація при дуговому розряді спостерігається саме в C_2H_2 . Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при дуговому розряді в трансформаторах, наведено на рис. 1. З рисунка видно, що при тому самому характері дефекту, концентрації газів відрізняються на кілька порядків, але при цьому між концентраціями наведених газів, існує значима кореляційна залежність.

Повзучий розряд. Даний вид розряду характеризується значно більшим виділенням енергії, у порівнянні із частковими або іскровими розрядами.

При повзучому розряді характерними газами є H_2 , C_2H_4 , CH_4 і меншою мірою C_2H_2 . Як видно з табл. 1, при повзучому розряді всі гази мають значиму кореляцію між собою. Це можна пояснити, як більшими значеннями виділеної енергії при повзучому розряді, так і тим що, порядку 30 % значень газів у даній вибірці отримані для трансформаторів, ушкоджених повзучим розрядом. Найбільший інтерес при аналізі кореляційних зв'язків між газами при повзучому розряді представляють залежності між окремими газами й сумою газів вуглеводневого ряду. Найбільше значення коефіцієнта кореляції (найбільший внесок) мають C_2H_4 , C_2H_6 і C_2H_2 , що повністю збігається з характеристикою даного типу дефекту.

Аналізуючи дані табл. 1, слід зазначити, що в міру росту енергії, що виділяється при різних типах дефектів, загальна кількість газів, що мають значиму кореляцію зростає, це цілком зрозуміло, оскільки зі збільшенням енергії дефекту зростає ступінь деструкції ізоляції.

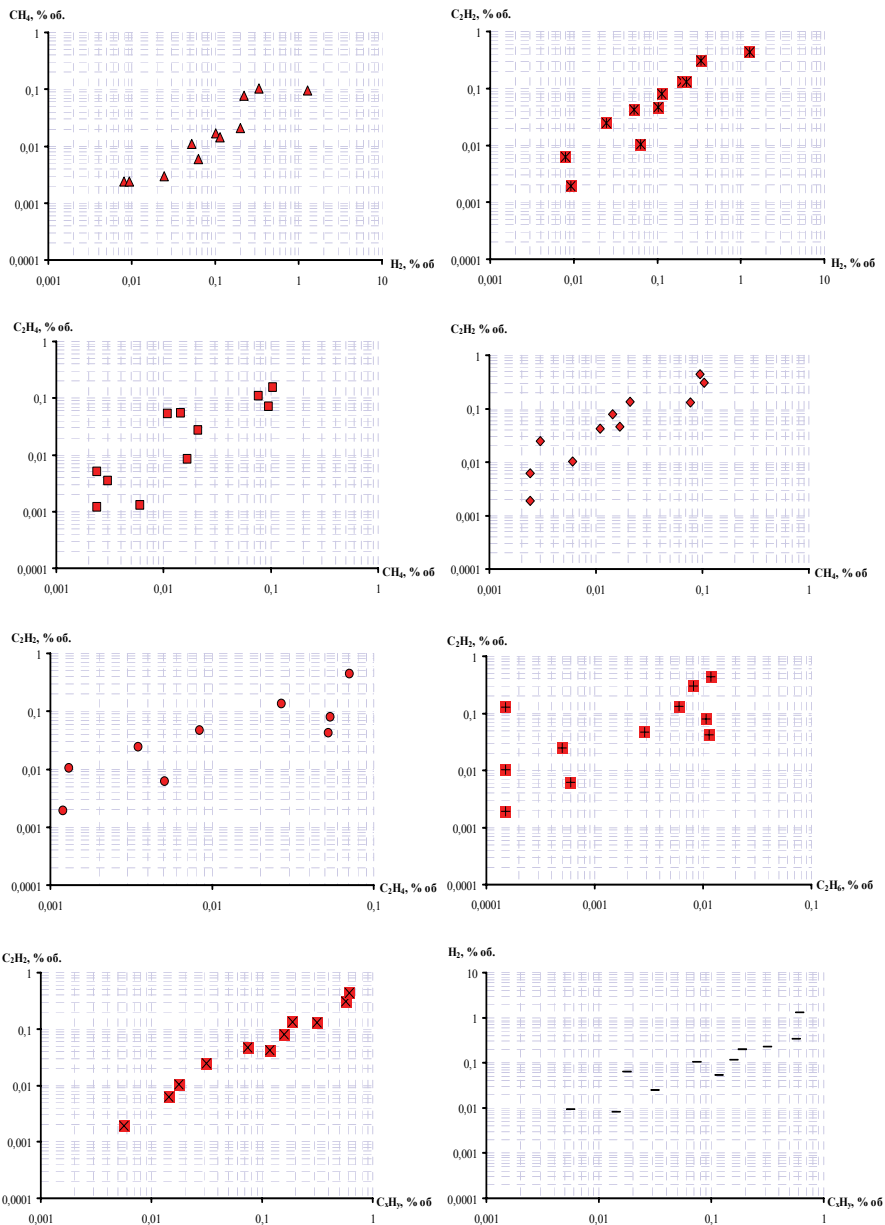


Рисунок 1 – Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при дуговому розряді

Термічні дефекти. Аналізувалися значення коефіцієнтів парної кореляції для перегрівів у діапазоні середніх і високих температур. Значення коефіцієнтів парної кореляції між газами для даних дефектів наведено в табл. 2. Проаналізуємо кореляцію між газами для кожного типу дефекту.

Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C). Розвиток даного дефекту супроводжується збільшенням концентрації C_2H_4 стосовно насичених вуглеводневих газів CH_4 і C_2H_6 і H_2 з ростом температури. При температурі 300-400°C концентрації C_2H_4 і C_2H_6 вирівнюються. При температурі 500°C і вище концентрація C_2H_4 перевищує концентрацію етану і C_2H_4 стає ключовим газом. Дані положення підтверджуються результатами кореляційного аналізу, які наведено в табл. 2. Як видно з таблиці значиму кореляцію між собою мають три гази: CH_4 і C_2H_6 і C_2H_4 . При цьому всі три гази мають приблизне однакове значення коефіцієнтів парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду.

Високотемпературний перегрів вище 700°C. З ростом температури швидкість утворення C_2H_4 зростає. При температурі вище 750°C, енергії, що виділилася досить для утвору незначних концентрацій C_2H_2 . Концентрація C_2H_6 відносно C_2H_4 помітно знижується. Примітно, що як і для попереднього випадку значиму кореляцію мають ті ж три гази CH_4 і C_2H_6 і C_2H_4 . Але основною відмінністю високотемпературного перегріву є те, що змінилася тіснота зв'язку між даними газами й сумою газів вуглеводневого ряду. При високотемпературному перегріві максимальне значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду, спостерігається етилену, потім етану й метану. Дану тенденцію наочно ілюструють залежності, наведені на рис. 2.

Комбіновані дефекти. Як показав аналіз вихідної вибірки, найбільше часто зустрічаються дефекти, у яких електричні дефекти супроводжуються перегрівами. До таких типів дефектів відносяться замикання магнітопроводу на бак, порушення контактних і струмоведучих з'єднань, обвуглювання ізоляції, дефекти РПН і ряд інших. На відміну від дефектів електричного й термічного характеру, склад і зв'язок між газами в маслі при комбінованих дефектах описаний, не так повно. У діючому в Україні СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006 для розпізнавання таких типів дефектів пропонується використовувати графічні образи, які представляють із себе комбінації відповідних образів, для термічних і електричних дефектів. Значення коефіцієнтів парної кореляції для трьох типів комбінованих дефектів наведено в табл. 3.

Перегрів у діапазоні середніх температур (від 300 до 700°C), що супроводжується розрядами. Як видно з табл. 3 при даному типі дефекту спостерігається значима кореляція між воднем, метаном і етиленом. Метан має значимий зв'язок з етиленом, а етан з етиленом і ацетиленом. Етилен має значиму кореляцію з усіма газами крім ацетилену, а ацетилен тільки з метаном.

Найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду мають метан і етилен.

Високотемпературний перегрів (вище 700°C) і розряд. Для даного типу дефекту (див. табл. 3) характерна наявність значимого кореляційного зв'язку між усіма газами за винятком ацетилену. Ацетилен не має значимому зв'язку з жодним з газів. Найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду мають етилен, етан, водень і метан. Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при даному типі дефекту наведено на рис. 3.

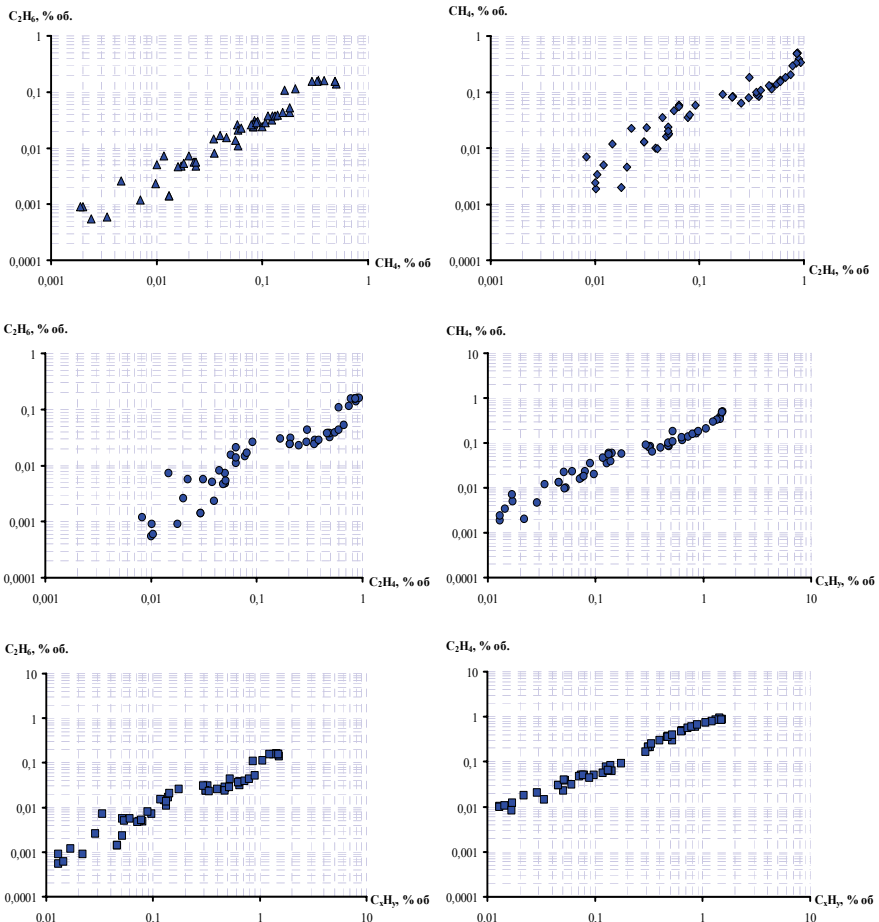


Рисунок 2 – Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при високотемпературному перегріві вище 700°C

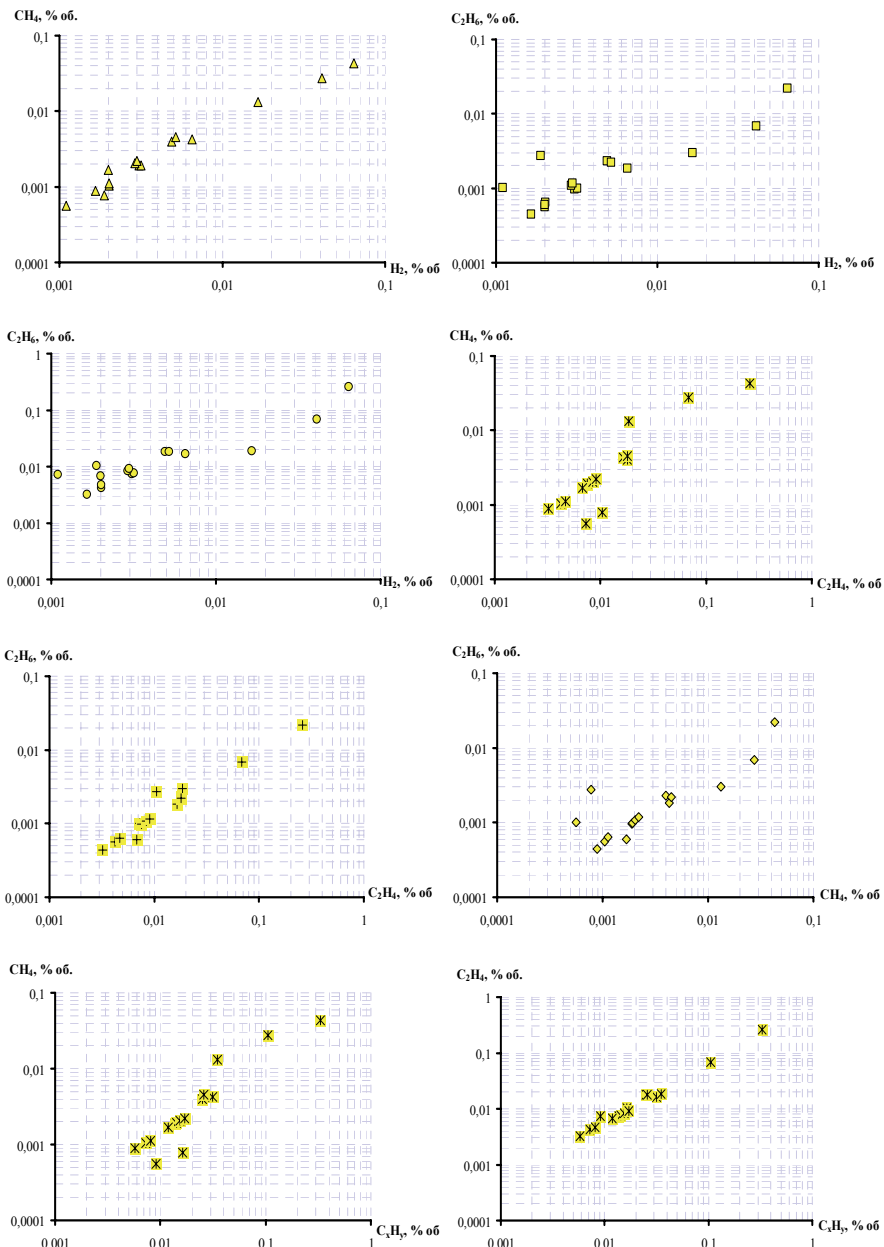


Рисунок 3 – Залежності між газами, що мають значимий кореляційний зв'язок, при високотемпературному перегріві вище 700°C, що супроводжується розрядами

Високотемпературний перегрів (вище 700°C) перехідний у дуговий розряд. Як видно з табл. 3 розвиток даного дефекту супроводжується наявністю значимої кореляції між усіма газами. При цьому найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду мають етилен, етан і метан.

Узагальнюючи результати, наведені в табл. 3, можна констатувати:

1) При розвитку комбінованих дефектів, значима кореляція спостерігається між газами, характерними для відповідних типів термічних і електричних дефектів;

2) У міру росту енергії, що виділяється при різних типах дефектів, загальна кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою зростає.

Висновки:

1. Для всіх типів дефектів газу, характерні для даного процесу мають значимий кореляційний зв'язок: H_2 , CH_4 – для часткових розрядів; H_2 , C_2H_2 – для дугових розрядів; H_2 , C_2H_4 , CH_4 – для повзучих розрядів; CH_4 , C_2H_4 і C_2H_6 – для дефектів термічного характеру;

2. Крім значимої кореляції між газами, характерними для даного типу дефекту, виявлений значимий зв'язок і для газів супутніх розвитку даного типу дефекту. Наприклад, значимий зв'язок між CH_4 і C_2H_4 при дугових розрядах;

3. При розвитку комбінованих дефектів, значима кореляція спостерігається між газами, характерними для відповідних типів термічних і електричних дефектів. Наприклад CH_4 , C_2H_4 і C_2H_6 (характерні для термічних дефектів) і H_2 (характерний для електричних дефектів);

4. У міру зростання енергії, що виділяється при різних типах дефектів, загальна кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою зростає;

5. Кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою залежить не тільки від енергії, що виділяється при даному типі дефекту, але й від стадії розвитку дефекту й ступені деструкції ізоляції;

6. Найбільше значення коефіцієнта парної кореляції із сумою газів вуглеводневого ряду, має газ характерний для даного типу дефекту. Наприклад, CH_4 – перегрів у діапазоні середніх температур, C_2H_4 – високотемпературний перегрів, C_2H_2 – дуговий розряд.

Напрямок подальших досліджень. Отримані результати є підставою для розробки статистичних моделей дефектів. Дані моделі повинні адекватно враховувати як кількісну, так і якісну відмінність у вмісті газів в маслі при різних типах дефектів.

Список літератури: 1. Липштейн Р. А. Трансформаторное масло / Р. А. Липштейн, М. И. Шахнович – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 296 с. 2. Джуварлы Ч. М. Электрический разряд в газовых включениях высоковольтной изоляции / Ч. М. Джуварлы, Г. В. Вечхайзер, П. В. Леонов. – Баку: ЭЛМ, 1983. – 192 с. 3. Зузак М. С. Обнаружение дефектов силовых трансформаторов по составу растворенных в масле газов / М. С. Зузак, В. Л. Таловерья, Э. Н. Мищенко // Электрические станции. – 1978. – № 6. – С. 75–76. 4. Райгородский И. М. Использование анализа газов для контроля состояния масляных трансформаторов // Энергохозяйство за рубежом. – 1975. – № 2. – С. 27-33. 5. Сенкевич Е. Д., Штерн Е. Н. Обнаружение частичных разрядов в образцах масляной изоляции с помощью хроматографического анализа // Электротехника. – 1974. – № 4. – С. 58-61. 6. Шутенко О. В. Комплексный корреляционный анализ показателей качества трансформаторного масла / О. В. Шутенко // Вісник НТУ «ХПІ». – Х.: НТУ «ХПІ», 2008. – № 45. – С. 156-167. 7. Л. Н. Большев, Н. В. Смирнов Таблицы математической статистики. – М.: «Наука», 1965. – 464 с. 8. Шутенко О. В., Баклай Д. Н. Планирование экспериментальных исследований в электроэнергетике. Методы обработки экспериментальных данных : Учеб. пособие для вузов / О. В. Шутенко, Д. Н. Баклай – Х.: НТУ «ХПІ», 2013. – 268 с.

Bibliography (transliterated): 1. Lipshtejn R. A. Transformatornoe maslo. R. A. Lipshtejn, M. I. Shahnovich. Moscow: Jenergoatomizdat, 1983. 296 Print. 2. Dzhubarly Ch.M. Jelektricheskiy razrjad v gazovyh vkljuchenijah vysokovolt'noj izoljicii. Ch. M. Dzhubarly, G. V. Vechhajzer, P. V. Leonov. Baku: JeLM, 1983. 192 Print. 3. Zuzak M. S. Obnaruzhenie defektov silovyh transformatorov po sostavu rastvorenyh v masle gazov. M. S. Zuzak, V. L. Talover'ja, Je. N. Mishhenko. Jelektricheskie stancii. 1978. No 6. 75-76 Print. 4. Rajgorodskij I. M. Ispol'zovanie analiza gazov dlja kontrolja sostojanija masljanyh transformatorov. Jenergohozajstvo za rubezhom. 1975. No 2. 27-33 Print. 5. Senkevich E. D., Shtern E. N. Obnaruzhenie chastichnyh razrjadov v obrazcah masljanoj izoljicii s pomoshh'ju hromatograficheskogo analiza. Jelektrotehnika. 1974. No 4. 58-61 Print. 6. Shutenko O. V. Kompleksnyj korreljacionnyj analiz pokazatelej kachestva transformatornogo masla. O. V. Shutenko. Visnik NTU «KhPI». Kharkiv: NTU «KhPI». 2008. No 45. 156-167 Print. 7. L. N. Bol'shev, N. V. Smirnov Tablicy matematicheskoj statistiki. Moscow: «Nauka», 1965. 464 Print. 8. Shutenko O. V., Baklaj D. N. Planirovanie jeksperimental'nyh issledovanij v jelektrojenergetike. Metody obrabotki jeksperimental'nyh dannyh. Ucheb. posobie dlja vtuzov. O. V. Shutenko, D. N. Baklaj. Kharkiv: NTU «KhPI», 2013. 268 Print.

Поступила (received) 17.04.2015

УДК 621.314

Аналіз кореляційних зв'язків між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів, при різних типах дефектів / О. В. Шутенко, Д. М. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 166-176. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Досліджена тіснота кореляційного зв'язку між газами, розчиненими в маслі силових трансформаторів при різних типах дефектів. Установлена наявність значимого зв'язку як між газами характерними для даного типу дефекту, так і між супутніми газами. Показано, що кількість газів, що мають значиму кореляцію між собою, зростає не тільки з ростом енергії, що виділяється при даному типі дефекту, але й від часу розвитку дефекту. Отримані результати є підставою для розробки статистичних моделей дефектів, які повинні адекватно враховувати як кількісну, так і якісну відмінність у вмісті газів в маслі при різних типах дефектів.

Ключові слова: хроматографічний аналіз розчинених у маслі газів, тип дефекту, кореляція між газами, електричний розряд, термічний перегрів, комбінований дефект.

УДК 519.2

Анализ корреляционных связей между газами, растворенными в масле силовых трансформаторов, при различных типах развивающихся дефектов / О. В. Шутенко, Д. Н. Баклай // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Техніка та електрофізика високих напруг. – Х.: НТУ «ХПІ», 2015. – № 20 (1129). – С. 166-176. – Бібліогр.: 8 назв. – ISSN 2079-0740.

Исследована теснота корреляционной связи между газами, растворенными в масле силовых трансформаторов при различных типах дефектов. Установлено наличие значимой связи как между газами характерными для данного типа дефекта, так и между сопутствующими газами. Показано, что количество газов, имеющих значимую корреляцию между собой, возрастает не только с ростом энергии, выделяемой при данном типе дефекта, но и от времени развития дефекта. Полученные результаты являются основанием для разработки статистических моделей дефектов, которые должны адекватно учитывать как количественное, так и качественное различие в газосодержании масел при различных типах дефектов.

Ключевые слова: хроматографический анализ растворенных в масле газов, тип дефекта, корреляция между газами, электрический разряд, термический перегрев, комбинированный дефект.

Analysis of correlation between the gases dissolved in transformer oil of power, when developing various types of defects / O. Shutenko, D. Baklaj // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Technique and electrophysics of high voltage. – Kharkiv: NTU "KhPI", 2015. – № 20 (1129). – С. 166-176. – Bibliogr.: 8. – ISSN 2079-0740.

The tightness of correlation communication between the gases dissolve in oil of power transformers at various types of defects are investigate. Presence of significant communication as between gases characteristic for the type of defect, and between accompany gases are establish. It are show that the quantity of the gases significant correlation among themselves, increased not only with growth of the energy allocated at type of defect, but also from time of development of defect. The receive results was the basis for working out of statistical models of defects which should consider adequately both quantitative, and qualitative distinction in content gas of oils at various types of defects.

Keywords: Chromatographic analysis of the dissolved gases in the oil, the type of defect, the correlation between the gases, electric discharge, thermal overheating, the combined defect.