

АНАЛІЗ ВМІСТУ ГАЗІВ В ОБЛАДНАННІ З РОЗРЯДАМИ ВИСОКОЇ ЕНЕРГІЇ

Шутенко О. В., Кулик О.С.

Національний технічний університет "Харківський політехнічний інститут"

Наведені результати комплексного аналізу вмісту газів в маслonaповненому обладнанні з розрядами високої енергії. Проаналізовані відсотковий вміст газів, значення відношень газів, побудовані графічні області та трикутники Дюваля для п'яти типів дефектів.

Постановка проблеми. Підвищення надійності розпізнавання типу дефекту, за результатами аналізу розчинених в маслі газів (АРГ) є актуальною та практично значущою задачею, вирішення якої дозволить значно підвищити експлуатаційну надійність маслonaповненого обладнання, особливо того, що експлуатується понад нормативний строк служби. Враховуючи, що кількість та склад газів, що виділяються в обладнанні з дефектами, що розвиваються, залежить від багатьох факторів, то не завжди існуючі методи розпізнавання типу дефекту дозволяють вірно та своєчасно встановити правильний діагноз. Особливо це небезпечно для електричних розрядів високої енергії, для яких характерне виділення великої кількості енергії за невеликий проміжок часу. Несвоєчасне розпізнавання таких дефектів може призвести до аварійного відключення обладнання та серйозним економічним збиткам.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. До розрядів з високою щільністю енергії відносяться [1]: дугові розряди, іскріння, пробій масла між обмотками або котушками, чи між котушками на землю. Відповідно до стандартів [1-3] для розрядів з високою щільністю енергії характерні наступні значення відношень газів: $C_2H_2/C_2H_4 > 1$, $0,1 < CH_4/H_2 < 1$, $C_2H_4/C_2H_6 > 2$. В методиці Дорненбурга [4] для розпізнавання розрядів високої енергії рекомендовані наступні відношення газів $0,1 < CH_4/H_2 < 1$, $C_2H_2/C_2H_4 > 0,75$, $C_2H_2/CH_4 > 0,3$, $C_2H_2/C_2H_6 > 2,5$. Методикою Роджерса [5] встановлені наступні значення: $0,1 < CH_4/H_2 < 1$, $0,5 < C_2H_2/C_2H_4 < 3$ або > 3 , $1 < C_2H_4/C_2H_6 < 3$ або > 3 і $C_2H_6/CH_4 < 1$. Згідно з методом ключового газу [6] в обладнанні з розрядами високої енергії має місце наступний вміст газів: 60%- H_2 , 30%- C_2H_2 , 3%- C_2H_4 , 5%- CH_4 і 2%- C_2H_6 . Такий же вміст газів для дугових розрядів регламентовано і в [1]: 60-65%- H_2 , 25-28%- C_2H_2 , 5-6%- C_2H_4 , 3-4%- CH_4 і 0,5%- C_2H_6 . В той же час в ряді джерел [7-13] наводяться результати АРГ з розрядами високої енергії, для яких значення відношень газів та їх відсотковий вміст відрізняється від регламентованих діючими стандартами. При цьому, не дивлячись на значний об'єм публікацій, комплексний аналіз вмісту газів в обладнанні з розрядами високої енергії, практично не виконувався. Остання обставина і послужила приводом для проведення даних досліджень.

Мега статті. Метою виконаних досліджень є підвищення достовірності розпізнавання типу дефекту, за рахунок комплексного аналізу вмісту газів

маслonaповненого обладнання з розрядами високої енергії.

Метод дослідження. В якості вихідних даних були використані результати АРГ по 319 одиницям МНО з електричними розрядами високої енергії, котрі були отримані авторами як в результаті співпраці з енергетичними компаніями України, так і наведені у відкритих літературних джерелах. На першому етапі для кожної одиниці МНО був розрахований відсотковий вміст газів в пробах масла [12]

$$A_i\% = 100 \frac{A_i}{\Sigma}, \quad (1)$$

де: $A_i\%$ – відсотковий вміст даного газу;
 A_i – значення концентрації даного газу;
 Σ – сума концентрацій газів вуглеводневого ряду та водню в пробі масла.

Виконаний аналіз показав, що при розвитку розрядів високої енергії в обладнанні вміст газів може суттєво відрізнятися, що дозволило виявити 4 найбільш характерні групи дефектів. Результати розрахунку наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Відсотковий вміст газів в обладнанні з розрядами високої енергії

№	Тип дефекту, об'єм вибірки	Вміст газів, %				
		H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2
1	Дуга низької енергії. $N=72$.	44-94	1-8	0-3	0,1-22	0,5-44
2	Дуга низької енергії. $N=3$.	25-45	1-4	0,2-15	4-15	35-55
3	Розряди високої енергії. $N=118$.	30-78	3-29	0-14	0,5-28	10-45
4	Розряди високої енергії. $N=14$.	0-2	0-1	0-5	1-45	50-98
5	Розряди високої енергії. $N=112$.	4-44	0-23	0-11	4-36	26-88

Далі, для кожної одиниці обладнання розраховувались значення відношень газів. Для зниження погрішності, розрахунок виконувався лише за умови, якщо значення концентрацій газів, що складають дане відношення, перевищували аналітичний поріг розпізнавання. Ці значення регламентовані в [1] і складають: $H_2=50$, $CH_4=C_2H_6=C_2H_4=15$ і $C_2H_2=3$ мкл/л. Результати розрахунку наведені в табл. 2. В якості графічного

методу інтерпретації був використаний метод графічних образів. Суть методу [1] полягає в тому, що в пробі масла визначається газ з максимальною концентрацією, далі розраховуються величини відношень кожного газу до газу, з найбільшою концентрацією. Будується графік образу дефекту, на якому по осі абсцис розміщують гази строго в наступному порядку: H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , а по осі ординат відкладають розраховані відношення. Отримані точки з'єднуються лінією. Отриманий графік порівнюється з еталонними образами і обирається той, де досягається максимальне співпадіння. Цей образ і визначає вид дефекту.

Таблиця 2 – Значення відношень газів в обладнанні з розрядами високої енергії

№	Значення відношень газів					
	CH_4/H_2	C_2H_6/CH_4	C_2H_4/C_2H_6	C_2H_2/CH_4	C_2H_2/C_2H_4	C_2H_2/C_2H_2
1	0,01-0,099	0,11-1,03	3,4-13,6	1,56-30,5	13,5-85,6	1,3-11,6
2	0,05-0,086	0,01-0,08	2,75-15,2	12,9-44	3-161	2,8-10,6
3	0,1-0,78	0,05-0,96	2,8-22,0	0,11-8,2	3,1-69,6	1,02-12,7
4	0,147-0,66	4,8-67,2	7,8-104,4	103-1020	15-167,2	1,2-92
5	0,11-0,981	0,063-1,4	2,06-30,9	1,26-31,6	3,46-249,3	1,02-18,5

Однак, як показано в [13] навіть при одному й тому ж дефекті, для обладнання одного і того ж типу, графічні образи можуть істотно відрізнятися, як один від одного так і від еталонних образів. Для обліку дрейфу значень координат графічних образів, в [14] запропоновано використовувати не еталонні образи, а еталонні області, які будуються за результатами АРГ, обладнання з одним і тим же типом дефекту. В якості кордонів еталонних областей використовуються максимальні і мінімальні значення координат (відношень кожного з газів до газу з максимальною концентрацією), отриманих для обладнання з даним типом дефекту. Також, при аналізі вмісту газів виконувалася діагностика з використанням трикутника Дюваля [15].

Аналіз результатів. Особливістю вмісту газів для обладнання за результатами АРГ якого сформована група дефектів №1, є вкрай низький вміст CH_4 , по відношенню до H_2 , і C_2H_6 по відношенню до C_2H_4 , але при цьому вміст C_2H_2 вище вмісту C_2H_4 (див. табл. 1, №1). Відповідно значення відношень $C_2H_2/C_2H_4 > 1$ і $C_2H_4/C_2H_6 > 2$, що характерно для розрядів високої енергії, а значення відношень $CH_4/H_2 < 0,1$, що характерно для часткових розрядів. На рис. 1 наведена графічна область (пунктирною лінією виділено її центр, який збігається з графічним образом даного дефекту). Як видно з рис. 1 графічний образ має зовнішню схожість з еталонними образами для розрядів з низькою і високою щільністю енергії, які регламентовані в [1]. В [7], подібні дефекти ідентифікуються як часткові розряди, в [8] як розряди, а в [9] як дуга. В роботі [10] для ідентифікації таких

дефектів був використаний термін "дуга низької енергії". Результати діагностики обладнання з такими дефектами методом Дюваля наведені на рис. 2.

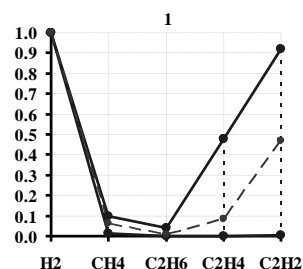


Рисунок 1 – Графічна область побудована за результатами АРГ обладнання з дуговими розрядами низької енергії і максимальним вмістом водню

Як видно з рисунку використання трикутника Дюваля для обладнання зі схожими значеннями відношень газів, привело до постановки трьох різних діагнозів (розряди низької, розряди високої енергії і перегрів, що супроводжується розрядами). На думку авторів така розбіжність обумовлена не врахуванням в методі Дюваля вмісту H_2 та C_2H_6 .

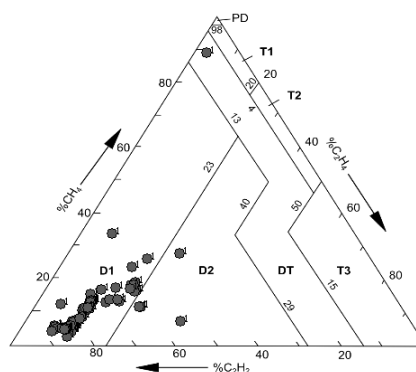


Рисунок 2 – Результати діагностики обладнання з дуговими розрядами низької енергії і максимальним вмістом водню методом Дюваля

Для обладнання з групи № 2 значення відношень газів аналогічні значенням відношень газів для групи №1. Але при цьому газом з максимальним вмістом є ацетилен. В роботі [9] подібний дефект ідентифікуються як "розряди високої енергії". Слід зазначити, що подібний вміст газів для трансформатора 12 мВА 69/3,8 кВ, наведено в роботі [11]. Однак причиною зростання вмісту ацетилену виявився не дефект трансформатора, а спрацьовування газового захисту під час грози. На рис. 3, наведена графічна область, побудована за результатами АРГ обладнання з дуговими розрядами низької енергії і максимальним вмістом C_2H_2 . Результати діагностики обладнання з дуговими розрядами низької енергії і максимальним вмістом ацетилену відображені на рис. 4. Як видно з рисунка незважаючи на низький вміст метану ($CH_4/H_2 < 0,1$) з використанням трикутника Дюваля, були поставлені діагнози: розряди з низькою і високою енергією.

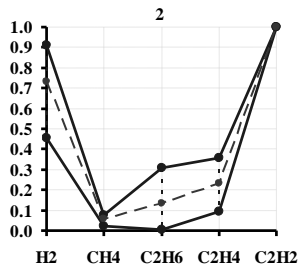


Рисунок 3 – Графічна область побудована за результатами АРГ обладнання з дуговими розрядами низької енергії і максимальним вмістом ацетилену

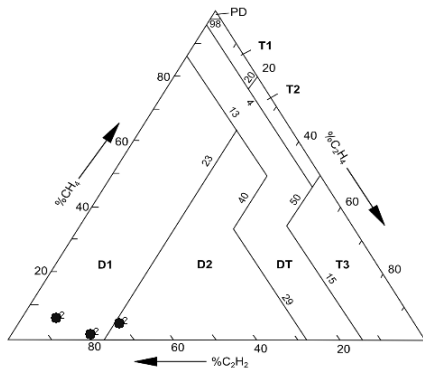


Рисунок 4 – Результати діагностики обладнання з дуговими розрядами низької енергії і максимальним вмістом ацетилену методом Дюваля

В обладнанні з групи №3 були виявлені розряди високої енергії. Як видно з табл. 1, (№3) вміст газів в обладнанні з розрядами високої енергії дещо відрізняється від регламентованих в [1], але при цьому значення відношень газів для цих дефектів відповідають розрядам високої енергії (див. табл. 2, №3). Слід зазначити, що подібний вміст газів має місце не тільки при дугових розрядах. Наприклад, причиною аварії шунтуючого реактору РОДЦ 110-750, стало внутрішнє коротке замикання, викликане повзучим розрядом по рейці. У трансформаторі ТДТН-10000/110, з аналогічним вмістом газів виявлено обрив струмопроводу перемикача. У автотрансформаторі АОДЦТН-167000/500/220/15,75 виявлено кілька дефектів: дуга в ярмовій балці верхньої частини трансформатора, іскріння в РПН і часткові розряди в районі введення 500 кВ. Графічна область, побудована за результатами АРГ обладнання з розрядами високої енергії, наведена на рис. 5. Як видно з рисунка при розвитку розрядів високої енергії значення відношень газів до газу з максимальним вмістом (в даному випадку до H_2) варіюються в досить широких межах, що може створити об'єктивні складнощі при розпізнаванні таких дефектів методом графічних образів [13]. Результати діагностики обладнання з розрядами високої енергії і максимальним вмістом водню, наведені на рис. 6. Як видно з рисунка використання трикутника Дюваля не у всіх випадках дозволяє встановити достовірний діагноз. Для обладнання з відносно низьким вмістом C_2H_4 (незважаючи на те що $C_2H_4/C_2H_6 \gg 2$) був

поставлений діагноз - "розряди низької енергії". А для обладнання з відносно низьким вмістом C_2H_2 (незважаючи на те що $C_2H_2/C_2H_4 > 1$) був поставлений діагноз - "перегрів і розряди".

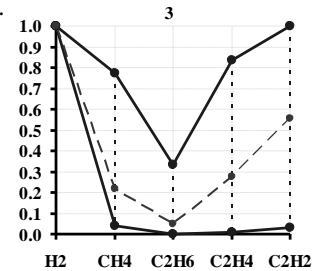


Рисунок 5 – Графічна область побудована за результатами АРГ обладнання з розрядами високої енергії і максимальним вмістом водню

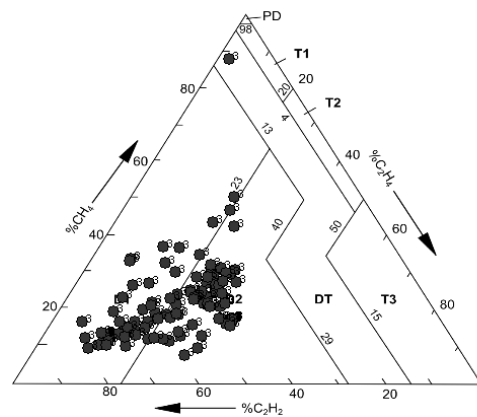


Рисунок 6 – Результати діагностики обладнання з розрядами високої енергії і максимальним вмістом водню методом Дюваля

Як видно з табл. 2 для обладнання з групи дефектів №4 значення відношень газів відповідає розрядам високої енергії. Однак як видно з табл. 1, в обладнанні з групи №4 має місце підвищений вміст ненасичених вуглеводнів (C_2H_2 і C_2H_4), при вкрай низькому вмісті насичених вуглеводнів (CH_4 і C_2H_6) і H_2 . Про це свідчать і графічна область дефекту на рис. 7.

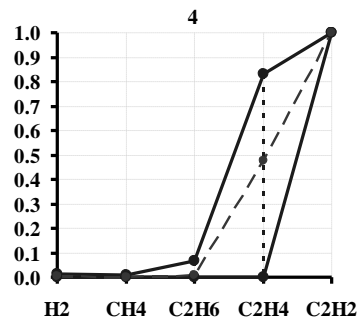


Рисунок 7 – Графічна область побудована за результатами АРГ обладнання з розрядами високої енергії і максимальним вмістом ацетилену.

У трансформаторі ТДТН потужністю 16 мВА і напругою 110/6 кВ з таким вмістом газів були виявлені сліди розрядів через ослаблення гайки на шпильці введення обмотки низької напруги. В роботі [16] для обладнання з таким вмістом газів був поставлений діагноз "часткові розряди", а в [17] "розряди високої енергії". В роботі [18] наведено аналіз динаміки зміни номограм дефектів в процесі розвитку дефекту для автотрансформатора ПС "Буран" 220 кВ. З наведених результатів випливає, що на початку розвитку дефекту газоміст відповідало дефекту №4, а по мірі розвитку дефект перейшов в повзучі розряди. Використання трикутника Дюваля для діагностики обладнання з групи №4 (див. рис. 8), показала наявність розрядів низької та високої енергії. При цьому як видно з рис. 8, діагноз "розряди низької енергії" поставлений для обладнання з більш високим вмістом ацетилену і більш низьким вмістом етилену (але при цьому $C_2H_4/C_2H_6 \gg 2$ і $C_2H_2/C_2H_4 > 1$).

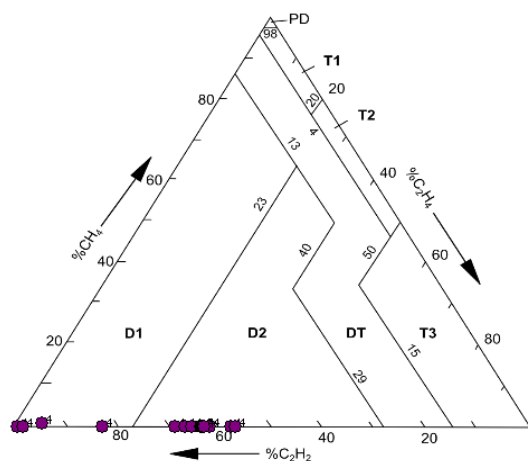


Рисунок 8 – Результати діагностики обладнання з розрядами високої енергії і максимальним вмістом ацетилену методом Дюваля

В обладнанні з групи дефектів №5 були виявлені розряди високої енергії, а газом з максимальним вмістом був C_2H_2 . Слід зазначити, що в реальній експлуатації такому вмісту газів може відповідати цілий ряд пошкоджень. Наприклад, в трансформаторі струму ТФЗМ напругою 110 кВ було виявлено обрив первинної обмотки від обмоткоутримувача. У трансформаторі ТРДНС потужністю 25 мВА і напругою 35 кВ виявлений перегрів і перегорання контактів пристрою РПН. Причиною виходу з ладу трансформатора ТДТН потужністю 31,5 мВА і напругою 110 кВ став пробій виткової ізоляції. Автотрансформатор АТДЦТН потужністю 125 мВА і напругою 220/110 кВ був пошкоджений повзучим розрядом. У трансформаторі ТДЦ потужністю 40 мВА і напругою 330 кВ на високовольтній обмотці виявлено дві хвилі деформації і електричне перекриття між котушками. У високовольтному вводі МТП-500/600 виявлено повзучий розряд по ізоляційному остову. А у введенні ГБМТ-45-220 / 2000 залитим маслом марки ГК виявлено відкладення Х-воску. Слід зазначити, що подібний вміст газів

може бути і не пов'язаний з розвитком дефекту в обладнанні. Наприклад в трансформаторі ТДТН потужністю 31,5 мВА і напругою 110/35/6 кВ, виявлено аналогічний вміст газів, після впливу струму короткого замикання. Графічна область, побудована за результатами АРГ обладнання з даним дефектом, наведена на рис. 9.

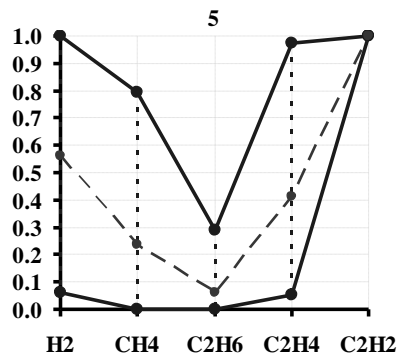


Рисунок 9 – Графічна область побудована за результатами АРГ обладнання з розрядами високої енергії і максимальним вмістом ацетилену

На рисунку 10 наведено результати діагностики обладнання за допомогою трикутника Дюваля. Як видно з рисунку, в залежності від вмісту етилену, трикутник Дюваля показав наявність, як розрядів високої енергії, так і розрядів низької енергії.

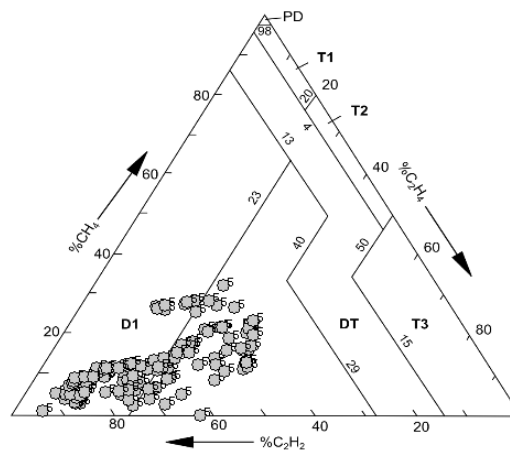


Рисунок 10 – Результати діагностики обладнання з розрядами високої енергії і максимальним вмістом водню методом Дюваля

Висновки. Отримані результати наочно демонструють, що навіть для добре вивчених і описаних дефектів вміст газів може істотно відрізнятися, що призводить до появи відмінностей у значеннях діагностичних критеріїв, які використовуються для розпізнавання типу дефекту. Подібні відмінності, а також виявлені в роботі розбіжності при використанні аналітичних та графічних методів розпізнавання, можуть викликати певні складнощі при ідентифікації типу дефектів. Наведені в роботі значення відношень газів, їх

відсотковий вміст, а також графічні області із зазначенням типу дефекту дозволяють розпізнавати такі дефекти як розряди високої енергії, з більшою вірогідністю і тим самим підвищити надійність маслонаповненого обладнання.

Список використаних джерел

1. СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006: Діагностика маслонаповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі. – Київ. – 2007.

2. IEC Publication 60599, Interpretation of the analysis of gases in transformer and other oil med electrical equipment in &, Geneva, Switzerland, 1999.

3. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, IEEE StandARCD C57.104-2008, Feb.2009.

4. Dornenburg E. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis / E. Dornenburg, W. Strittmater // Brown Boveri Review. – 1974. – Vol. 61– pp. 238-274.

5. Rogers R.R. U.K. Experiences in the Interpretation of Incipient Faults in Power Transformers by Dissolved Gas-in-Oil Chromatography Analysis (A Progress Report) // Minutes of Forty-Fourth Int. Conf. of Doble Clients, 1977, Section 10-501.

6. Saranya S. Comparative study of various dissolved gas analysis methods to diagnose transformer faults / S. Saranya, U. Mageswari, N. Roy, R. Sudha // International Journal of Engineering Research and Applications (IJERA) – 2013. – Vol.3. – Issue 3. – pp. 592 – 595.

7. Ikb al Abulmageed Hameed. Monitoring Power Transformer Using Fuzzy Logic / Ikb al Abulmageed Hameed, Saher Rady Farag // Journal of Engineering and Development. – 2013. – Vol. 17.–№.6. – pp. 146-163.

8. Geetha M. Integrating Fuzzy IEC Expert System based Fault Diagnosis for Power Transformer Using Dissolved Gas Analysis / Geetha M, Jovitha Jerome, Manikandan P. // Journal of Electrical Engineering – 2014. – Vol. 14. – № 2. – pp. 348 – 354.

9. Hamed Ahadpour. A Novel Approach for Diagnosis of Power Transformers Internal Faults Using an Electronic Nose / Ahadpour Hamed // Journal of Basic and Applied Scientific Research. – 2011 – pp. 808-815.

10. Sherif S. M. Ghoneim, Artificial Neural Networks for Power Transformers Fault Diagnosis Based on IEC Code Using Dissolved Gas Analysis. / Sherif S. M. Ghoneim, Ibrahim B. Taha // International journal of control avtomation and systems. – 2013. – Vol. 4. –№.2. – pp. 18–21.

11. Paul Boman. TOGA® Presentation Review Of Case Studies // http://www.cbmu.org/pages/eic_files/2014-Transformer-Oil-Gas-Analysis.pdf.

12. Shutenko Oleg. Faults diagnostics of high-voltage equipment based on the analysis of the dynamics of changing of the content of gases / Oleg Shutenko // Energetika – 2018. – Т. 64. – №. 1 – pp 11-22.

13. Шутенко О. В. Анализ графических образов, построенных по результатам ХАРГ для высоковольтных силовых трансформаторов с

различными типами дефектов / О. В. Шутенко // Вісник Національного технічного університету "Харківський політехнічний інститут". Збірник наукових праць. Серія: Енергетика: надійність та енергоефективність – Харків: НТУ "ХПІ". – 2017. – № 31 (1253). – С. 97–121.

14. O. Shutenko, I. Jakovenko Fault Diagnosis of Power Transformer Using Method of Graphic Images. 2017 IEEE International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF-2017), October 17-20, 2017, Lviv, Ukraine, pp. 66–69.

15. Duval M. New techniques for dissolved gas in oil analysis / M. Duval // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2003. – Vol. 19, № 2. – pp. 6 – 15.

16. Zahriah Binti Sahri. Support Vector Machine-Based Fault Diagnosis of Power Transformer Using k Nearest-Neighbor Imputed DGA Dataset / Zahriah Binti Sahri, Rubiyah Binti Yusof // Journal of Computer and Communications. – 2014 – Vol. 2. – № 09. – pp. 22-31.

17. Hazlee Azil Illias. Transformer Incipient Fault Prediction Using Combined Artificial Neural Network and Various Particle Swarm Optimisation Techniques / Hazlee Azil Illias, Xin Rui Chai, Ab Halim Abu Bakar, Hazlie Mokhlis // Plos One. – 2015. – Т. 10. – №. 6. – pp. 1-16.

18. Шутенко О. В. Особенности динамики изменения критериев используемых для интерпретации результатов ХАРГ в силовых трансформаторах с разными типами дефектов / О. В. Шутенко // Новое в Российской электроэнергетике – Москва. – 2017. – № 9. – С. 30-49.

Анотація

АНАЛІЗ ВМІСТУ ГАЗІВ В ОБЛАДНАННІ З РОЗРЯДАМИ ВИСОКОЇ ЕНЕРГІЇ

Шутенко О. В., Кулик О.С.

Наведені результати комплексного аналізу вмісту газів в маслонаповненому обладнанні з розрядами високої енергії. Проаналізовані відсотковий вміст газів, значень відношень газів, побудовані графічні області і трикутники Дюваля для п'яти типів дефектів.

Abstract

ANALYSIS OF GAS CONTENT IN EQUIPMENT WITH HIGH ENERGY DISCHARGES

O. Shutenko, O. Kulyk

The results of a complex analysis of the gas content in oil-filled equipment with high-energy discharges are given. Analyzed the percentage of gases, the values of the relations of gases, built graphic areas and Duval's triangles for the five types of defects.