

*О.В. ШУТЕНКО*, канд. техн. наук, доц., НТУ "ХПИ"  
*Д.Н. БАКЛАЙ*, ассистент кафедры ПЭЭ НТУ "ХПИ"  
*Т.А. ОСТРИКОВА*, магистр кафедры ПЭЭ НТУ "ХПИ"

**РАСПОЗНАВАНИЕ ТИПА ДЕФЕКТА  
ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ  
НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА ОБРАЗОВ ДЕФЕКТОВ,  
ПОСТРОЕННЫХ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ  
ХРОМАТОГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ  
В МАСЛЕ ГАЗОВ**

Предложена методика для распознавания образов возможных дефектов трансформаторов по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов, основанная на методе эталонов. Выполнена проверка предложенной методики на 75 трансформаторах, у которых в процессе эксплуатации были обнаружены дефекты. Доказана высокая эффективность предложенной методики.

**Ключевые слова:** дефекты трансформаторов, хроматографический анализ.

**Введение.** Распознавание типа возможного дефекта, является одним из важнейших этапов интерпретации результатов хроматографического анализа растворенных в масле газов (ХАРГ). В настоящее время действующими отечественными [1] и зарубежными [2, 3] нормативными документами предусматривается использования следующих подходов, для определения типа дефектов:

- 1) критерий характерных газов;
- 2) критерий отношений пар газов;
- 3) графический метод построения образа дефектов.

В отличие от первых двух критериев, которые имеют четкие количественные границы и могут быть легко запрограммированы для распознавания в автоматическом режиме, реализация графического метода требует вмешательства оперативного персонала. Это обусловлено тем, что постановка диагноза, т.е., сравнение эталонного и эксплуатационных образов осуществляется вручную, другими словами, отсутствует методика для распознавания образов возможных дефектов трансформаторов.

Отсутствие подобной методики, сильно ограничивает использование графического метода интерпретации результатов ХАРГ, в рамках единой информационно-аналитической системы, для диагностики состояния высоковольтного электроэнергетического оборудования. В связи с этим разработка методики для распознавания графических образов дефектов трансформаторов является актуальной.

**Цель статьи.** В статье, предложена методика для распознавания графических образов дефектов трансформаторов, основанная на метрических методах распознавания образов.

**Анализ публикаций.** Графические образы разных дефектов были предложены для определения типа дефекта японскими исследователями [1]. Тип развивающихся в трансформаторах дефектов можно определить графически по основным газам: водороду, метану, этилену, этану и ацетилену. Метод был разработан на основе практического опыта сопоставления фактически выявленных дефектов в трансформаторе во время внутреннего осмотра с составом газов, выявленных методом ХАРГ. В то же время образы дефектов отображают наиболее общие зависимости в отношениях между отдельными газами, во время нагревания до различных температур или разрядных процессах.

Порядок построения графического образа дефекта [1]:

1.Графические образы дефектов строятся для оборудования, в котором концентрации отдельных газов или хотя бы одного из них превышают установленные для данного оборудования граничные значения;

2.По результатам ХАРГ из газов  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  выбирают газ, который имеет наибольшую абсолютную концентрацию. Для дефектов электрического характера основным газом может быть водород или ацетилен. Для дефектов термического характера основным газом является метан или этилен в зависимости от температуры нагрева в зоне развития дефекта;

3.Рассчитывают величину отношения каждого газа к газу с максимальной абсолютной концентрацией по углеводородным газам и водороду, причем для основного газа это отношение равно единице, отношение всех остальных газов меньше единицы;

4.Строятся графики. Для этого по оси  $X$  откладываются пять равных отрезков и обозначаются полученные точки соответствующими газами в следующей последовательности:  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$ . По оси  $Y$  откладывается отрезок произвольной величины, и обозначить его цифрой "1". Далее для каждого газа по оси  $Y$  необходимо отложить соответствующую величину отношения каждого газа к газу с максимальной абсолютной концентрацией;

5. Полученные точки соединить прямыми линиями. Построенный график сравнивается с эталонными графиками и определяется характер дефекта.

Приведенный метод достаточно прост и может быть использован для определения типа дефекта оборудования в автоматическом режиме. Однако для этого необходимо разработать методику сравнения эталонного образа с действительным.

**Метод решения.** Поскольку каждому из возможных дефектов трансформатора соответствует только один образ, т.е. области диагнозов не пересекаются, то целесообразно воспользоваться детерминистскими методами распознавания [4].

Полученные по результатам хроматографического анализа, а также эталонные образы дефектов можно представить в виде набора точек с координатами  $H_2/A_{\max}$ ,  $CH_4/A_{\max}$ ,  $C_2H_6/A_{\max}$ ,  $C_2H_4/A_{\max}$ ,  $C_2H_2/A_{\max}$  (в знаменателе находится газ с максимальной абсолютной концентрацией). Тогда вполне логично, для автоматического распознавания типа дефекта, использовать метод диагностики по расстоянию до эталона. В качестве меры расстояния можно использовать величину:

$$l = \sqrt{\left| H_2^* - \frac{H_2}{A_{\max}} \right|^v + \left| CH_4^* - \frac{CH_4}{A_{\max}} \right|^v + \left| C_2H_6^* - \frac{C_2H_6}{A_{\max}} \right|^v + \left| \tilde{N}_2H_4^* - \frac{\tilde{N}_2H_4}{A_{\max}} \right|^v + \left| C_2H_2^* - \frac{C_2H_2}{A_{\max}} \right|^v}, \quad (1)$$

где:  $A_{\max}$  – газ с максимальной концентрацией для эксплуатационного образа дефекта; \* – концентрации газов для эталонных образов;  $v$  – мера расстояния.

В методе эталонов [4] отнесение предъявленного для распознавания объекта к одному из  $n$  диагнозов (состояний) совершается по наименьшему расстоянию до эталона. В качестве эталона для диагноза  $D_i$  принимается типичный объект, имеющий диагноз  $D_i$  (рис. 1) или образ, характерный для данного типа дефекта.

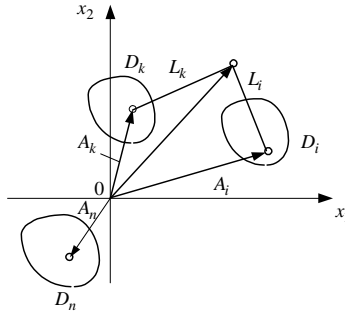


Рис. 1. Диагностика по расстоянию до эталона

Допустим, что в пространстве признаков используется диагностическая мера расстояния  $L$  до эталонных точек  $a_1^*, a_2^*, \dots, a_n^*$ . Объект  $x$  относят к диагнозу  $D_i$ , если мера расстояния между точками  $x, a_n^*$  минимально:

если  $L_i = \min$ , то  $x \in D_i$

или в другой форме

$x \in D_i$ , если  $L_i < L_k$  ( $k = 1, 2, \dots, n; k \neq i$ ).

В некоторых случаях условие принимается в более строгой форме  $L_k - L_i > \epsilon$ , где  $\epsilon$  – порог распознавания ( $\epsilon > 0$ ). Очевидно, что надежность распознавания будет тем выше, чем меньше расстояние  $L_i$  по сравнению с другими расстояниями. Это можно охарактеризовать коэффициентом распознавания:

$$\xi_i = \frac{1/L_i}{\sum_{s=1}^n 1/L_s}. \quad (2)$$

Величина  $\xi_i$  играет роль, сходную с вероятностью диагноза так как

$$\sum_{i=1}^n \xi_i = 1. \quad (3)$$

Распознавание признается надежным, если  $\xi_i > \xi_0$ , и где  $\xi_0$  – заранее выбранный уровень распознавания.

Чем больше коэффициент помех, тем ближе к предельной, граничной области располагается объект, предъявленный для распознавания.

Т.е. тип дефекта трансформатора, соответствует эталонному обра-

зу, если диагностическое расстояние между координатами образа для диагностируемого трансформатора и данного эталонного образа минимально. Определить значение меры расстояния  $\nu$  можно из соображений обеспечения максимального значения коэффициента распознавания  $\xi$ .

**Практическая реализация.** Проиллюстрируем работу приведенной методики на примере трансформатора ПС "Постниково" Т-1, ТДТН-40/110/35/6. Значение концентраций растворенных в масле газов, для данного трансформатора приведены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС "Постниково" Т-1, % об.

Дата	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
30.09.1999	отс.	0,032	0,00046	0,177	0,0239	0,03	0,6

Как видно из таблицы концентрации метана, этилена и этана превысили граничные значения, рекомендуемые в [1]. Для определения характера возможного дефекта построим эксплуатационный образ дефекта, учитывая что, ключевым газом является этилен. Для этого находим отношения каждого из газов к этилену H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, CH<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>/C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> и строим образ, рис. 2.

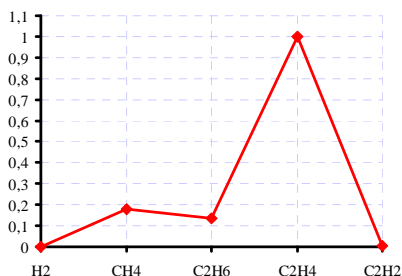


Рис. 2. Эксплуатационный образ предполагаемого дефекта в трансформаторе Постниково Т-1, ТДТН-40/110/35/6

На рис. 3. приведены эталонные образы дефектов [1] для ключевого газа этилен.

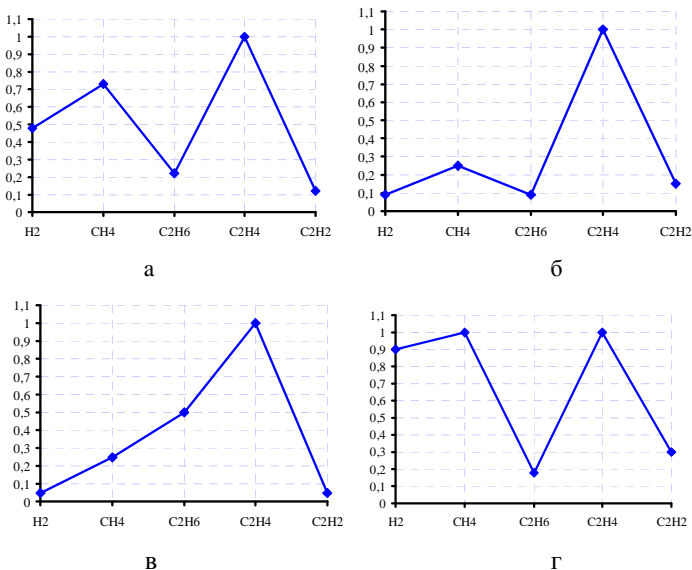


Рис. 3. Эталонные образцы дефектов, ключевой газ этилен: а, б – высокотемпературный нагрев; в, г – нагрев переходящий в разряды

Определим значения диагностических расстояний между образом дефекта для трансформатора "Постниково" Т-2 и эталонными образцами дефектов из рис. 3, используя для начала квадратичную меру расстояния:

$$l_{(x-a)} = \sqrt{\left(0,48 - \frac{0}{0,177}\right)^2 + \left(0,73 - \frac{0,032}{0,177}\right)^2 + \left(0,22 - \frac{0,0239}{0,177}\right)^2 + \left(1 - \frac{0,177}{0,177}\right)^2 + \left(0,12 - \frac{0,00046}{0,177}\right)^2} = 0,744.$$

$$l_{(x-b)} = \sqrt{\left(0,06 - \frac{0}{0,177}\right)^2 + \left(0,25 - \frac{0,032}{0,177}\right)^2 + \left(0,06 - \frac{0,0239}{0,177}\right)^2 + \left(1 - \frac{0,177}{0,177}\right)^2 + \left(0,12 - \frac{0,00046}{0,177}\right)^2} = 0,139.$$

$$l_{(x-c)} = \sqrt{\left(0,05 - \frac{0}{0,177}\right)^2 + \left(0,25 - \frac{0,032}{0,177}\right)^2 + \left(0,5 - \frac{0,0239}{0,177}\right)^2 + \left(1 - \frac{0,177}{0,177}\right)^2 + \left(0,12 - \frac{0,00046}{0,177}\right)^2}$$

$$+ \left( \left| 1 - \frac{0,177}{0,177} \right| \right)^2 + \left( \left| 0,05 - \frac{0,00046}{0,177} \right| \right)^2 = 0,378 .$$

$$l_{(x-d)} = \sqrt{\left( \left| 0,9 - \frac{0}{0,177} \right| \right)^2 + \left( \left| 1 - \frac{0,032}{0,177} \right| \right)^2 + \left( \left| 0,18 - \frac{0,0239}{0,177} \right| \right)^2 + \left( \left| 1 - \frac{0,177}{0,177} \right| \right)^2 + \left( \left| 0,3 - \frac{0,00046}{0,177} \right| \right)^2} = 1,233 .$$

Выполним расчет коэффициентов распознавания:

Для образа дефекта *a* рис. 3:

$$\xi_a = \frac{\frac{1}{(l_{(x-a)})^2}}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2} = 0,029 .$$

Для образа дефекта *b* рис. 3:

$$\xi_b = \frac{\frac{1}{(l_{(x-b)})^2}}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2} = 0,846 .$$

Для образа дефекта *в* рис. 3:

$$\xi_c = \frac{\frac{1}{(l_{(x-c)})^2}}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2} = 0,114 .$$

Для образа дефекта *г* рис. 3:

$$\xi_d = \frac{\frac{1}{(l_{(x-d)})^2}}{(l_{(x-a)})^2 + (l_{(x-b)})^2 + (l_{(x-c)})^2 + (l_{(x-d)})^2} = 0,011 .$$

Сравнивая полученные значения коэффициентов распознавания, приходим к выводу, что при уровне распознавания 0,846, можно классифицировать дефект в трансформаторе "Постниково" Т-2, как высокотемпературный перегрев. При вскрытии данного трансформатора данный диагноз подтвердился. Зафиксирована "горячая точка" в сердечнике, перегрев меди из-за вихревых токов и плохих контактов, температура дефекта превысила 700 °С, повреждением затронута основная изоляция. Выполним аналогичные расчеты и, меняя значение меры

расстояния  $\nu$  от 1 до 8, построим зависимость коэффициента распознавания от меры расстояния смотри рис. 4.

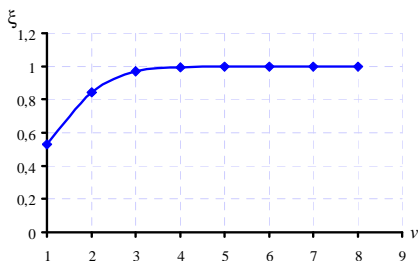


Рис. 4. Зависимость коэффициента распознавания  $\xi$  от значения меры диагностического расстояния для трансформатора Постниково Т-1, ТДТН-40/110/35/6.

Как видно из рисунка повышение меры расстояния более резко подчеркивает диагноз с наименьшим расстоянием. При этом полученная зависимость является нелинейной и имеет четко выраженную тенденцию к насыщению. Наиболее оптимальной мерой расстояния является кубическая мера, которая обеспечивает распознавание с достоверностью близкой к единице.

Выполненный анализ 75 трансформаторов, у которых в процессе эксплуатации были обнаружены дефекты, продемонстрировал высокую эффективность предложенной методики. Поставленный с ее помощью диагноз во всех случаях, полностью совпал с результатами вскрытия трансформаторов. При этом значения коэффициентов распознавания, при значении меры расстояния  $\nu=3$ , находились в пределах  $\xi=0,968-0,994$ , а зависимость коэффициента распознавания от меры диагностического расстояния, во всех случаях, имела тенденцию аналогичную рис. 4.

Однако, как и большинство рекомендованных в [1] критериев для интерпретации результатов ХАРГ, метод граничных значений приводит к неверному диагнозу в случаях, когда рост концентраций газов не связан с дефектом в трансформаторе. В этом легко убедиться на примере трансформатора ПС "Шахта-21" Т-2, "Луганскоблэнерго". Результаты хроматографического анализа приведены в табл. 2.

Таблица 2 – Значения концентраций растворенных в масле газов в трансформаторе ПС "Шахта-21" Т-2", % об.

Дата	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	CO	CO <sub>2</sub>
20.07.2007	0,0039	0,0094	0,00001	0,0353	0,0039	0,0257	0,1899



Как видно из табл. 2 наблюдается превышение граничных значений метаном, этиленом, этаном и водородом, что может быть интерпретировано как наличие дефекта. Критериальные отношения пар газов имеют следующие значения:

$$\frac{C_2H_2}{C_2H_4} = 0,00028; \quad \frac{CH_4}{H_2} = 2,410; \quad \frac{C_2H_4}{C_2H_6} = 9,051,$$

что согласно п. 8.2.1 СОУ-НЕС 46.501:2006 можно интерпретировать как термический дефект с температурой более 700 °С;

Графический образ дефекта, построенный по результатам ХАРГ представлен на рис. 5.

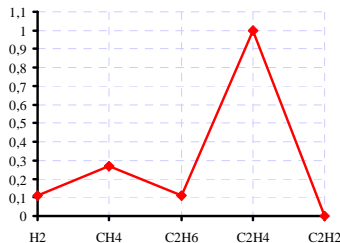


Рис. 5. Эксплуатационный образ дефекта в трансформаторе ПС "Шахта-21" Т-2".

Выполненный расчет коэффициентов распознавания по диагностическому расстоянию до эталонных образов, приведенных на рис. 3, при значении меры диагностического расстояния  $v=3$ , показал, что с достоверностью  $\xi=0,984$  эксплуатационный образ соответствует эталонному образу, приведенному на рис. 3,б. Т.е высокотемпературному нагреву. Однако причиной роста концентраций растворенных в масле газов оказался не дефект трансформатора, а нарушение контактных соединений на низкой стороне трансформатора Т-2, фаза А. Причем данное нарушение было обнаружено с помощью проведения тепловизионного анализа, термограмма данного дефекта приведена на рис. 6.



Рис. 6. Результаты тепловизионного контроля контактных соединений на створе НН трансформатора ПС ""Шахта-21" Т-2".

Таким образом, и критерий отношений пар газов и графический метод распознавания дефекта привели к неточной постановке диагноза, что могло привести к необоснованному выводу трансформатора из эксплуатации.

Несмотря на приведенный недостаток, графический метод, достаточно прост и эффективен при определении типа дефекта в трансформаторном оборудовании, что является его неоспоримым преимуществом.

**Направление дальнейших исследований.** Для снижения вероятности принятия ошибочных решений при использовании графического метода предлагается, выполнить оценку его диагностической ценности. Для чего провести анализ образов дефектов, полученных для бездефектных трансформаторов, у которых концентрации растворенных в масле газов превышают граничные значения. Подобная оценка позволит выявить возможные области применения графического метода, в которых будет достигнута максимальная достоверность распознавания, а также определить наиболее оптимальный набор методов статистической обработки, которые позволят снизить вероятность принятия ошибочного решения.

#### **Выводы:**

1. Предложена методика для автоматического распознавания образов возможных дефектов трансформаторов, основанная на методе эталонов;

2. Установлено, что повышение меры расстояния более резко подчеркивает диагноз с наименьшим расстоянием. При этом полученная зависимость является нелинейной и имеет четко выраженную тен-

денцию к насыщению;

3. Наиболее оптимальной мерой расстояния является кубическая мера, которая обеспечивает распознавание типа дефекта с достоверностью близкой к единице.

4. Выполненная проверка предложенной методики на 75 трансформаторах, у которых в процессе эксплуатации были обнаружены дефекты, продемонстрировал ее высокую эффективность;

**Список литературы:** 1. Діагностика маслonaповненого трансформаторного обладнання за результатами хроматографічного аналізу вільних газів, відібраних із газового реле, і газів, розчинених у ізоляційному маслі СОУ-Н ЕЕ 46.501:2006. – Київ. – 2007. – 92 с. 2. Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле: РД 153-34.0-46.302-00. – Офиц. изд. М.: НЦ ЭНАС, 2001. – 28 с. – (Отраслевой руководящий документ действует с 01.01.2001). 3. IEEE Std C57.104, Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers, 1991. 4. *Биргер И.А.* Техническая диагностика / *И.А. Биргер* – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.



**Шутенко Олег Владимирович** закончил электроэнергетический факультет Харьковского политехнического института в 1992 г. по специальности "Электроизоляционная, конденсаторная и кабельная техника". В 2010 году защитил диссертацию на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.09.13 – техника сильных электрических и магнитных полей. Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного оборудования. В настоящее время работает доцентом кафедры "Передача электрической энергии", НТУ "ХПИ".



**Баклай Дмитрий Николаевич** закончил электроэнергетический факультет Национального технического университета "Харьковский политехнический институт" в 2010 г. по специальности "Электрические системы и сети". Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного оборудования. В настоящее время работает ассистентом кафедры "Передача электрической энергии", НТУ "ХПИ".



**Острикова Татьяна Анатольевна** магистр кафедры "Передача электрической энергии" Национального технического университета "Харьковский политехнический институт". Основным направлением научных исследований является диагностика состояния изоляции высоковольтного маслonaполненного оборудования.

*Поступила в редколлегию 05.10. 2012*

**Распознавание типа дефекта высоковольтных силовых трансформаторов на основе анализа образов дефектов, построенных по результатам хроматографического анализа растворенных в масле газов / Шутенко О.В., Баклай Д.Н., Острикова Т.А. // Вісник НТУ "ХПІ". Серія: Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика. – Х.: НТУ "ХПІ", 2012. – № 49 (955). – С. 129-140. Бібліогр.: 4 назв.**

Запропоновано методику для розпізнавання образів можливих дефектів трансформаторів за результатами хроматографічного аналізу розчинених в маслі газів, яка заснована на методі еталонів. Виконана перевірка запропонованої методики на 75 трансформаторах, у яких в процесі експлуатації були виявлені дефекти. Доведено високу ефективність запропонованої методики.

**Ключові слова:** дефекти трансформаторів, хроматографічний аналіз.

A technique for recognition of images of probable damages of transformers by results of chromatographic analysis of gases dissolved in oil, based on a method of standards is proposed. Check of the proposed technique on 75 transformers in which damages have been while in service found out is executed. High efficiency of the proposed technique is proved.

**Keywords:** transformer damages, chromatographic analysis.