

ИНФОРМАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ГРАФИЧЕСКОГО АНАЛИЗА РАСТВОРЕННЫХ ГАЗОВ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА

В.С. Ноздренков, В.И. Романовский, М.В. Петровский
Сумский государственный университет, г. Сумы

Разработана информационная модель графического анализа растворенных газов трансформаторного масла. В качестве критерия дефектов впервые предложена методика, определяющая расстояние между эталонным вектором дефекта и вектором, характеризующим текущее состояние трансформатора. Предложенная модель может быть программно реализована, что позволит автоматизировать процесс диагностирования дефектов трансформатора.

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Показатели надежности и экономичности функционирования электростанций, подстанций и электрических сетей определяются уровнем эксплуатационной надежности основного электрооборудования, в частности, силовых трансформаторов [1]. Для масляных трансформаторов одним из наиболее важных является хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ), в результате которого определяются концентрации водорода (H_2), метана (CH_4), ацетилена (C_2H_2), этилена (C_2H_4), этана (C_2H_6), оксида углерода (CO), диоксида углерода (CO_2). По результатам проведенного ХАРГ, на основании руководящих документов производится диагностика технического состояния трансформатора. Данная статья посвящена созданию информационной модели графического анализа растворенных газов трансформаторного масла, что позволит автоматизировать диагностический процесс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С помощью АРГ в трансформаторах можно обнаружить две группы дефектов.

Группа 1. Перегревы токоведущих соединений и элементов конструкции остова.

Основные газы: C_2H_4 - в случае нагрева масла и бумажно-масляной изоляции выше $600^\circ C$ или C_2H_2 - в случае перегрева масла, вызванного дуговым разрядом.

Характерными газами в обоих случаях являются: H_2 , CH_4 и C_2H_6 .

Перегрев токоведущих соединений может определяться нагревом и выгоранием контактов переключающих устройств; ослаблением и нагревом места крепления электростатического экрана; обрывом электростатического экрана; ослаблением винтов компенсаторов отводов НН; ослаблением и нагревом контактных соединений отвода НН и шпильки проходного изолятора; лопнувшей пайкой элементов обмотки; замыканием параллельных и элементарных проводников обмотки и др.

Перегрев металлических элементов конструкции остова может определяться: неудовлетворительной изоляцией листов электротехнической стали; нарушением изоляции стяжных шпилек или накладок, ярмовых балок с образованием короткозамкнутого контура; общим нагревом и недопустимыми местными нагревами от магнитных полей рассеяния в ярмовых балках, бандажах, прессирующих кольцах и винтах; неправильным заземлением магнитопровода; нарушением изоляции амортизаторов и шипов поддона реактора, домкратов и прессирующих колец при распрессовке и др.

Группа 2. Электрические разряды в масле.

Электрические разряды в масле могут быть разрядами большой и малой мощности.

При частичных разрядах основным газом является H_2 , характерными газами с малым содержанием - CH_4 и C_2H_2 .

При искровых и дуговых разрядах основными газами являются H_2 или C_2H_2 ; характерными газами с любым содержанием - CH_4 и C_2H_4 .

Превышение граничных концентраций CO и CO_2 может свидетельствовать об ускоренном старении и/или увлажнении твердой изоляции. При перегревах твердой изоляции основным газом является диоксид углерода.

Основные (ключевые) газы - наиболее характерные для определенного вида дефекта:

1. Дефекты электрического характера:

водород - частичные разряды, искровые и дуговые разряды;

ацетилен - электрическая дуга, искрение;

2. Дефекты термического характера:

этилен - нагрев масла и бумажно-масляной изоляции выше $600\text{ }^\circ\text{C}$;

метан - нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур ($400-600$) $^\circ\text{C}$ или нагрев масла и бумажно-масляной изоляции, сопровождающийся разрядами;

этан - нагрев масла и бумажно-масляной изоляции в диапазоне температур ($300-400$) $^\circ\text{C}$;

оксид и диоксид углерода - старение и увлажнение масла и/или твердой изоляции;

диоксид углерода - нагрев твердой изоляции.

Вид развивающихся в трансформаторах дефектов можно ориентировочно определить графически по основным газам: водороду, метану, этилену и ацетилену.

Построение графиков по относительным концентрациям.

1. Рассчитываются относительные концентрации газов

$$a_i = \frac{A_i}{A_{zpi}}, \quad (1)$$

где A_i – измеренное значение концентрации i -го газа, % об;

A_{zpi} – граничная концентрация i -го газа, % об;

Таблица 1- Граничные концентрации растворенных в масле газов

Оборудование	Концентрации газов, % об						
	H_2	CH_4	C_2H_2	C_2H_4	C_2H_6	CO	CO_2
Трансформаторы напряжением 110-500 кВ	0,01	0,01	0,001	0,01	0,005	0,05* 0,06	0,6(0,2)* 0,8(0,4)
Трансформаторы напряжением 750 кВ	0,00 3	0,002	0,001	0,002	0,001	0,05	0,40
Реакторы напряжением 750 кВ	0,01	0,003	0,001	0,001	0,002	0,05	0,40

Примечание. * для CO - в числителе приведено значение для трансформаторов с азотной или пленочной защитами масла, в знаменателе - для трансформаторов со свободным дыханием; для CO_2 - в числителе приведены значения для трансформаторов со свободным дыханием при сроке эксплуатации до 10 лет, в знаменателе - свыше 10 лет, в скобках приведены те же данные для трансформаторов с пленочной или азотной защитами масла

2. По расчетным относительным концентрациям максимальное значение $a_{\max i}$ соответствует основному газу (кроме CO_2 ; CO_2 - основной газ, если $\text{CO}_2 > 1$);

$a_i > 1$ – характерный газ с высоким содержанием;

$0,1 < a_i < 1$ – характерный газ с малым содержанием;

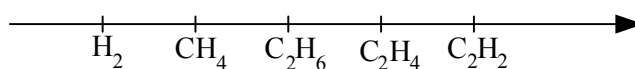
$a_i < 0,1$ – нехарактерный газ.

3. По результатам хроматографического анализа масла (A_i) на основании выражения (1) вычисляются относительные концентрации (a_i) водорода и углеводородных газов.

4. Определяется основной газ в данном анализе.

5. Определяется величина отношения $a_i/a_{\max i}$ по углеводородным газам и водороду, причем для основного газа это отношение равно единице.

6. По оси X необходимо отложить пять равных отрезков и обозначить полученные точки соответствующими газами в следующей последовательности:



7. По оси Y отложить отрезок произвольной величины и обозначить его цифрой "1".

8. Для каждого газа по оси Y отложить соответствующую величину отношения $a_i/a_{\max i}$.

9. Полученные точки соединить прямыми линиями.

10. Построенный график сравнить с двенадцатью эталонными графиками (на рис. 1-4 приведены примеры графиков для дефектов электрического характера, где основной газ - водород) и определить характер дефекта.

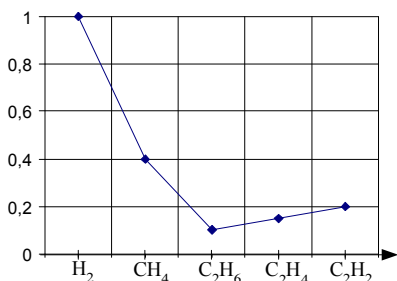


Рисунок 1- Разряды малой мощности

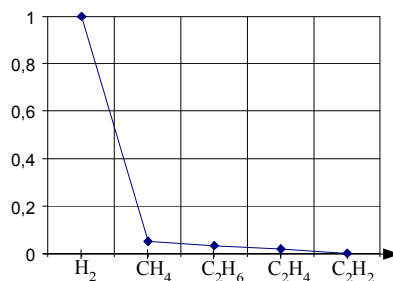


Рисунок 2- ЧР с низкой плотностью энергии

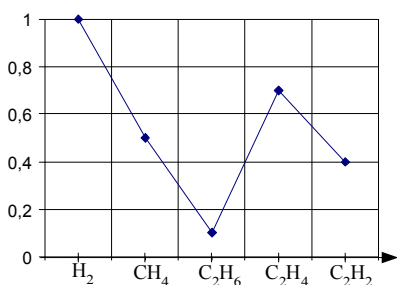


Рисунок 3- Дефекты, вызванные искрением

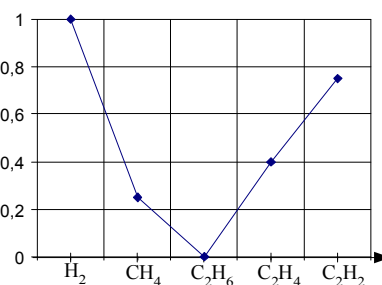


Рисунок 4- Дефекты, вызванные дугой

11. При сравнении графиков необходимо учитывать модальность и основной газ.

2. Для дефектов термического характера (перегревы при плохих контактах, токах утечки, от магнитных полей рассеяния в ярмовых балках, бандажах, прессующих кольцах и винтах и т.п.) основным газом является метан или этилен в зависимости от температуры нагрева в зоне развития дефекта.

Каждое состояние, заданное эталонными графиками, можно представить вектором 5-мерного пространства, называемого пространством переменных состояния.

Таблица 2 - Эталонные векторы дефектов

Пор. номер	Основной газ	Вид дефекта	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₆	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂
			a_i/a_{maxi}				
1	Водород	Разряды малой мощности	1	0,4	0,1	0,15	0,2
2	Водород	ЧР с низкой плотностью энергии	1	0,05	0,033	0,017	0
3	Водород	Дефекты, вызванные искрением	1	0,5	0,1	0,7	0,4
4	Водород	Дефекты, вызванные дугой	1	0,25	0	0,4	0,75
5	Ацетилен	Дефекты, вызванные дугой	0,8	0,18	0,05	0,15	1
6	Метан	Дефекты термического характера в диапазоне средних температур	0,5	1	0,35	0,45	0
7	Метан	Дефекты термического характера в диапазоне средних температур	0,1	1	0,15	0,5	0
8	Метан	Дефекты термического характера, переходящие в ЧР	0,55	1	0,2	0,1	0
9	Этилен	Дефекты термического характера в диапазоне высоких температур	0,05	0,2	0	1	0,1
10	Этилен	Дефекты термического характера в диапазоне высоких температур	0	0,25	0,5	1	0
11	Этилен	Высокотемпературный нагрев, переходящий в дугу	0,8	0,9	0,1	1	0,4

Для диагностики состояния трансформатора необходимо вычислить расстояние между 5-мерными векторами, эталонным $ET = (ET_{H_2}, ET_{CH_4}, ET_{C_2H_4}, ET_{C_2H_6}, ET_{C_2H_2})$, представленным в табл. 2, и вектором, характеризующим текущее состояние трансформатора $TS = (TS_{H_2}, TS_{CH_4}, TS_{C_2H_4}, TS_{C_2H_6}, TS_{C_2H_2})$.

Расстояние между двумя 5-мерными векторами [3]

$$\Delta_i = \sqrt{(ET_{H_2} - TS_{H_2})^2 + (ET_{CH_4} - TS_{CH_4})^2 + (ET_{C_2H_4} - TS_{C_2H_4})^2 + (ET_{C_2H_6} - TS_{C_2H_6})^2 + (ET_{C_2H_2} - TS_{C_2H_2})^2}, \quad (2)$$

Эталонный вектор, находящийся на наименьшем расстоянии от вектора, характеризующего текущее состояние трансформатора, укажет вид дефекта.

Рассмотрим пример. В трансформаторе ТРДЦН-63000/110 по результатам АРГ получили следующие концентрации растворенных в масле газов:

$H_2 = 0,004\%$ об, $CH_4 = 0,084\%$ об, $C_2H_2 = 0\%$ об, $C_2H_4 = 0,02\%$ об, $C_2H_6 = 0,011\%$ об, $CO = 0,05\%$ об, $CO_2 = 0,48\%$ об.

1. Определяем относительные концентрации (a_i) для каждого газа:

$a_{H_2} = 0,004/0,01 = 0,4$, $a_{CH_4} = 0,084/0,01 = 8,4$, $a_{C_2H_2} = 0$,
 $a_{C_2H_4} = 0,02/0,01 = 2,0$, $a_{C_2H_6} = 0,011/0,005 = 2,2$.

2. По полученным относительным концентрациям определяем основной газ: $8,4 = A_{CH_4} > A_{C_2H_6} > A_{C_2H_4} > A_{H_2}$, т.е. основной газ – метан.

3. Определяем величины отрезков по оси Y для каждого газа:

$CH_4 = 1$, $H_2 = 0,4/8,4 = 0,05$, $C_2H_4 = 2/8,4 = 0,24$, $C_2H_2 = 0$, $C_2H_6 = 2,2/8,4 = 0,26$.

Формируем вектор, характеризующий текущее состояние трансформатора

$TS = (TS_{H_2}, TS_{CH_4}, TS_{C_2H_4}, TS_{C_2H_6}, TS_{C_2H_2}) = (0,05; 1,0; 0,26; 0,0,24; 0,0)$.

Для удобства результаты расчетов расстояния между эталонными и текущим вектором состояния приведены в таблице.

Таблица 3 – Результаты расчетов

Пор. номер	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	Δ
1	1	0,4	0,1	0,15	0,2	1,155941
2	1	0,05	0,033	0,017	0	1,380673
3	1	0,5	0,1	0,7	0,4	1,244869
4	1	0,25	0	0,4	0,75	1,456262
5	0,8	0,18	0,05	0,15	1	1,512316
6	0,5	1	0,35	0,45	0	0,504678
7	0,1	1	0,15	0,5	0	0,286705
8	0,55	1	0,2	0,1	0	0,522685
9	0,05	0,2	0	1	0,1	1,138069
10	0	0,25	0,5	1	0	1,095536
11	0,8	0,9	0,1	1	0,4	1,155725

Наименьшее расстояние соответствует эталонному вектору №7 – дефект термического характера в диапазоне средних температур, что подтверждается экспериментальными данными [2].

ВЫВОДЫ

Предложенная информационная модель позволяет определить вид дефектов развивающихся в трансформаторах. Данная модель основана на графическом методе анализа, но реализована аналитически, что

позволяет автоматизировать процесс поиска дефектов. Предложенная модель может использоваться как альтернатива метода определения характера дефектов в трансформаторе по отношению концентрации пар газов.

SUMMARY

INFORMATIVE MODEL OF GRAPHIC ANALYSIS OF CUT-IN GASES OF TRANSFORMER OIL

V.S. Nozdrenkov, V.I. Romanovskiy, M.V. Petrovskiy

The informative model of graphic analysis of cut-in gases of transformer oil is offered. As a criterion of defects is used distance between the standard vector of defect and vector characterizing current status of transformer. The offered model can be programmatic realized, that will allow to automatize the process of diagnosing transformer's difects.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев Б. Л. Контроль состояния крупных силовых трансформаторов. -М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2002.-216с.
2. Объем и нормы испытаний электрооборудования. – 6-е изд., перераб. и доп. РД 34.45-51.300-97. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2001.
3. Сигорский В.П. Математический аппарат инженера. - Киев: Техніка, 1975. – 768 с.

Ноздренков В.С., кандидат техн. наук;
Романовский В.И., кандидат техн. наук;
Петровский М.В., кандидат физ.-мат. наук

Поступила в редакцию 25 ноября 2008 г.