



УДК 621.313

**АНАЛИЗ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ  
ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИДА ДЕФЕКТА  
ТРАНСФОРМАТОРА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АРГ****THE GAS SOLUBILITY PROBLEM IN  
TRANSFORMER OIL**

**Овчинников Константин Валерьевич**, аспирант кафедры «Электрические машины» Уральского федерального университета имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19, E-mail: konstov@gmail.com

**Давиденко Ирина Васильевна**, д-р. техн. наук, профессор каф. «Электрические машины», Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина, Россия, 620002, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19. E-mail: inguz21@yandex.ru. Тел.: +7(922)619-19-88

**Konstantin V. Ovchinnikov**, postgraduate student, dep. «Electric Machines», Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: konstov@gmail.com

**Irina V. Davidenko**, Doctor Sc., Prof., Department « Electric Machines », Ural Federal University named after the first President of Russia B.N.Yeltsin, 620002, Mira str., 19, Ekaterinburg, Russia. E-mail: inguz21@yandex.ru. Ph.: +7(922)619-19-88

**Аннотация:** Общеизвестно, что оценка технического состояния силовых трансформаторов по результатам анализа газов, растворенных в масле (АРГ), является чувствительным методом диагностирования, обладающим широким спектром выявляемых дефектов. АРГ используется в РФ более 30 лет. Зарубежные и отечественные национальные стандарты, как правило, включают несколько методов идентификации вида дефекта трансформатора по результатам АРГ, так как методы имеют различную точность выявления дефектов разного вида. До сих пор эксперты создают новые методы, стремясь повысить распознавание характера дефекта. Эта статья посвящена анализу точности идентификации вида дефекта наиболее известными и используемыми методами.

**Abstract:** It is generally recognized that the assessment of the technical state of power transformers based on the analysis of gases dissolved in oil (DGA) is an analytical diagnostic method with a wide range of detectable defects. DGA in Russia is actively used for more than 30 years. Foreign and domestic standards, as a rule, offer several methods for identifying transformer defects based on the results of DGA, since they have different accuracy in detecting defects of different types. Until now, new methods are being studied, seeking to improve recognition of a defect. This article is devoted to the analysis of the accuracy of finding the shortcomings of the most known and suitable methods.

**Ключевые слова:** анализ растворенных в масле газов, идентификация вида дефекта, силовой трансформатор.

**Key words:** DGA, fault type identification, power transformer.

**СБОР ДАННЫХ ДЛЯ ТЕСТИРОВАНИЯ**

Для тестирования использовалась база данных (БД) дефектов силовых трансформаторов, собранная в Экспертно-диагностической системе оценки состояния маслонаполненного оборудования (ЭДИС) «Альбатрос» за 25 лет ее эксплуатации на предприятиях энергетики. Каждый случай в тестируемой выборке имел историю развития повреждения, отраженную в результатах АРГ, паспортные характеристики трансформатора и описание акта его повреждения. Акт представляет собой описание повреждения с помощью 15 классификационных справочников (места, причины, характера дефекта, виновника, последствий и т.д.). Все случаи проверялись экспертами на соответствие описания

повреждения (его полноту и достоверность) и идентификации вида дефекта по результатам АРГ. После анализа из БД ЭДИС «Альбатрос» было отобрано 139 случаев повреждения трансформаторов и 139 результатов АРГ, соответствующий характеру дефекта по его описанию и отражающих кульминацию его проявления. Далее были выделены желаемые для распознавания на основе АРГ классы технического состояния трансформатора, приведенные в таблице 1. Затем эксперты проставили каждому случаю повреждения трансформатора номер класса состояния согласно таблице 1.

Таблица 1.  
Классы технического состояния трансформатора

№	Техническое состояние
1	нормальное состояние оборудования
	естественное старение
2	слабый нагрев (до 300 С)
3	средний нагрев (300-600 гр. С)
4	сильный нагрев (более 600 гр. С)
5	частичные разряды
	ползущий разряд
6	искрение
	дуга
7	сильное искрение и сильный нагрев
	искрение, превалирующее над нагревом
8	нагрев, превалирующий над искрением
9	переток масла из переключающего устройства
10	

#### ВЫБОР МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ ДЕФЕКТА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ АРГ

Несмотря на то, что АРГ используется для оценки технического состояния трансформаторов более 30 лет и выявляет до 80% дефектов трансформаторов на ранней стадии их развития, точная интерпретация результатов АРГ до сих пор считается искусством. Международные, национальные и отечественные стандарты включают несколько методов определения вида дефекта по результатам АРГ [1,2,3]. Это можно объяснить разной достоверностью выявления методами различных дефектов. Стремясь повысить точность распознавания вида повреждения, эксперты до сих пор создают новые методы. Для сравнения достоверности методов, нами были отобраны хорошо известные и широко применяемые:

1. **Метод номограмм (МН).** Данный метод разработан японскими диагностами в 1980-е годы. В стандарте нашей страны [2] появился с 2000 г, а в практике диагностирования отечественного парка трансформаторов использоваться 25-30 лет. В основе метода лежит сравнение диаграммы отношений измеренных концентраций газов  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_2$  относительно максимальной концентрации с номограммами типовых дефектов. Сравнивая номограммы дефектов – с диаграммой газов относительно максимального исследуемого трансформатора, выделяют наиболее близкий образ и таким образом определяют характер дефекта. Метод предлагает 12 номограмм, описывающих 8 типов дефектов, согласно классификации, приведенной в таблице 1. Отметим, что для некоторых дефектов приводятся по 2 номограммы. Основными преимуществами являются широкий набор диагностируемых типов дефектов, наглядность, простота использования, отсутствие недиагностируемых состояний.

2. **Метод пар газов (МПГ).** В международной практике для идентификации вида дефекта

трансформатора применяется 5 соотношений пар газов: (R1)  $CH_4/H_2$ , (R2)  $C_2H_2/C_2H_4$ , (R3)  $C_2H_2/CH_4$ , (R4)  $C_2H_6/C_2H_2$ , (R5)  $C_2H_4/C_2H_6$ .

МПГ один из первых методов интерпретации АРГ. Он был предложен британцем Роджерсом в 1967 году. Базируется на том, что для каждого типа дефекта определённые соотношения пар растворённых в масле газов находятся в заданных диапазонах значений. Непосредственно в методе пар газов используется R1, R2 и R5-е соотношения.

Преимущества – прост в использовании, давно и широко применяется, определяет 8 типов дефектов и исправное состояние трансформатора. В России используется с начала применения АРГ. Различные вариации метода используются как в отечественных [2,5], так и в зарубежных [1, 3] нормативных документах.

Недостаток метода – наличие недиагностируемых технических состояний трансформатора, когда определенный набор значений R1, R2 и R5 не соответствуют ни одному из приведённых в МПГ вариантов.

3. **«Треугольник Дюваля» (ТД).** Метод включен в международный стандарт [3]. Известен достаточно давно [6], однако до сих пор совершенствуется [7]. На данный момент М. Дюваль предложил 6 треугольников, предназначенных для диагностирования состояния трансформатора и устройства регулирования под нагрузкой, заполненных как синтетическими маслами, так и маслами минерального и органического происхождения. Для оценки состояния трансформаторов, заполненных минеральными маслами используется треугольник № 1 (для выставления одного из 7 основных диагнозов) и треугольники № 4 и 5 для уточнения. При сравнении достоверности распознавания дефектов различными методами мы использовали только треугольник № 1.

ТД является, как и метод номограмм, графическим, наглядным, и не имеет недиагностируемых состояний трансформатора.

4. **Метод Дорненбурга (МД).** Также как и метод пар газов строится на соотношениях газов, растворённых в масле. При этом используется соотношения R1-R4. Метод прост в применении, однако различает лишь 3 типа дефектов – нагрев (без раз деления на интенсивности), ЧР и искрение.

МД известен с 70-х годов и до сих пор применяется в стандарте США [1]. Недостатками метода являются небольшое число распознаваемых дефектов и наличие недиагностируемых состояний.

5. **Ансамбли газов (АГ).** Данный метод входил в отечественный стандарт [5] и использовался до 2000г.

Согласно методу, должна быть оценена степень превышения концентраций газов над своими граничными значениям. Согласно методу, проводится атрибуция степени превышения и буквенного кода. Например, газу с максимальным превышением присваивается код "а", следующему за ним по степени превышения - код "б" и т.д. Получившийся код (набор букв) код сравнивается с кодами, соответствующими основным типам дефектов трансформаторов. Метод идентифицирует 6 различных типов дефектов, прост в использовании, не имеет нераспознаваемые состояния трансформаторов. В этом методе, единственном из рассматриваемых, используются граничные значения концентраций газов. Если значения граничных концентраций газов достоверно описывают область его исправного состояния, то их применение в АГ повышает точность метода, иначе - наоборот.

**6. Графический метод пар газов (ГМ).** Метод основан на соотношениях пар газов R1, R2 и R5. По сути, это графическая интерпретация МПГ, однако, границы соотношений, задающие область различных дефектов, другие. Метод распознает 6 видов дефектов, широко известен, достаточно давно присутствует в международном стандарте [3]. Достоинствами метода являются наглядность и простота использования, а недостатком - наличие недиагностируемых состояний трансформатора.

Метод Дюваля, Дорненбурга и ГМ не используются в отечественной практике. Часть перечисленных методов дополнительно использует соотношение газов  $CO_2/CO$  для определения задета ли дефектом бумажная изоляция. В нашем анализе точности методов мы не рассматривали это соотношение.

Достоинствами методов номограмм и Дюваля по сравнению с другими, приведенными выше, является то, что они распознают дефекты, сочетающие тепловой и электрический характер.

#### МЕТОДИКА ТЕСТИРОВАНИЯ МЕТОДОВ НА ТОЧНОСТЬ ИДЕНТИФИКАЦИИ ВИДОВ ДЕФЕКТОВ

Сложность сравнения методов заключалась в том, что каждый метод имеет свой набор распознаваемых классов технического состояния, отличающийся по количеству и названию дефектов. Например, метод Дорненбурга различает только 3 вида дефекта, а метод номограмм приводит 12 различных образов дефектов. Поэтому сначала эксперты соотнесли виды дефектов, определяемых по каждому методу, с набором, представленным в таблице 1. Отметим, что часть классов технического состояния (с № 8 по № 10 таблицы 1) не встречается ни в одном методе, таким образом это общий недостаток исследуемых методов.

Алгоритм распознавания вида дефекта каждым методом был реализован с использованием языка программирования Python. Далее каждый результат АРГ выборки поврежденных анализировался каждым из 6 тестируемых методов и код, определенного методом дефекта (в классификации таблицы 1), запоминался. Затем по каждому виду дефекта выявлялась статистика количества правильно определенных случаев каждым методом. Кроме того, анализировалась статистика ложного определения методами дефектов. При ложном распознавании был важен вид ошибки: путает метод степень проявления дефекта (например, температуру нагрева) или тепловой и электрический характер дефекта. Последний вид ошибки считался наиболее грубым.

#### АНАЛИЗ ТЕСТИРОВАНИЯ ТОЧНОСТИ МЕТОДОВ ИНТЕРПРЕТАЦИИ АРГ

На рисунке 1 приведены результаты тестирования 6 методов по достоверности распознаванию вида дефекта трансформатора по результатам АРГ. Оценка точности методов проводилась на основании сравнения вида дефекта, определенного по методу, с видом дефекта, определенного экспертом по описанию вскрытия (ремонта) трансформатора и результатам АРГ.

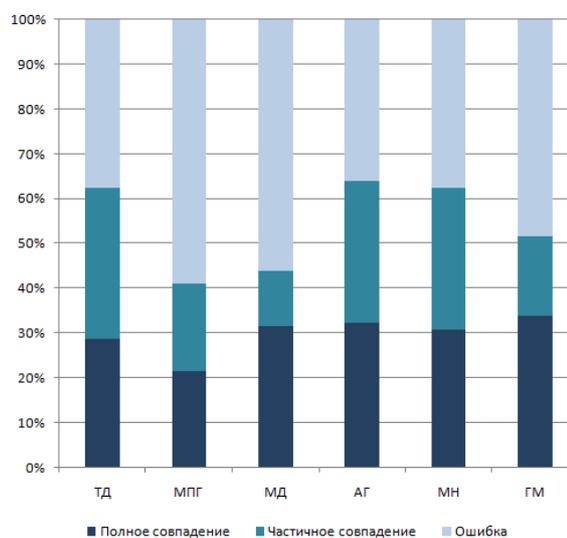


Рис. 1. Оценка точности методов

Из рисунка 1 видно, что полное совпадение с экспертной оценкой большинство методов даёт лишь в трети случаев. Лучшими с этой точки зрения оказались методы ансамбля газов и графический метод из [3]. Чуть уступают методы номограмм и Дорненбурга. Аутсайдер точного диагностирования – метод пар газов.

По нашему мнению, оценивать качество распознавания методом вида повреждения, необходимо, принимая во внимание и неточные,

но, в целом, верные диагнозы. Когда метод правильно определял характер дефекта (тепловой или электрический), но путал интенсивность его проявления с соседним классом технического состояния трансформатора. Например, вместо слабого нагрева (до 300 °С), показывал средний нагрев (300-600 гр. С). На рисунке 1 количество таких случаев обозначено, как "частичное совпадение". Если сравнивать точность определения методами дефектов по сумме полного и частичного совпадения определения класса технического состояния, то лучшие результаты (более 63%) показали методы ансамбля газов, треугольник Дюваля и метод номограмм. Существенно хуже результаты (около 40%) у методов Дорненбурга и пар газов.

Все методы достаточно хорошо определяют общий характер дефекта - тепловой или электрический. Слабый нагрев распознал только графический метод пар газов, он же наиболее точно идентифицирует средний нагрев. Остальные методы его путают с сильным нагревом. Повторим, что метод Дорненбурга совсем не различает классы состояния нагрева.

Частичные разряды не идентифицировали ни разу методы пар газов и Дюваля. Остальные методы, в равной степени, выявили только треть случаев из возможных. Отметим, что его часто (в половине случаев) все методы в равной степени путают с исправным состоянием трансформатора.

Искрение и ползущие разряды распознают плохо все методы. Методы пар газов, Дюваля и Дорненбурга не определили правильно их ни разу. Методы ансамбля газов и номограмм идентифицировал правильно ЧР в 15% случаях. Чаще всего этот дефект путают с дугой методы Дюваля, пар газов и ГМ (50-30% ошибок). Методы ансамбля газов и номограмм путают искрение с ЧР в 30% случаях. Дугу все методы диагностируют довольно хорошо (70-65 % распознавания). Путают дугу с искрением наиболее часто методы Дюваля, ансамбля газов, номограмм и ГМ (17-14% случаев). Искрение, превалирующее над нагревом с сильным нагревом путают в более, чем в половине случаев все методы.

Дефекты, сочетающие тепловой и электрический характер проявления не распознает ни один из рассматриваемых методов (№8,9 в таблице 1).

## ВЫВОДЫ

Менее точными методами по идентификации вида дефектов являются методы пар газов Роджерса и Дорненбурга, которые не распознают или ошибаются с распознаванием в 55-60%. Ни один из рассмотренных методов не диагностирует

переток масла из переключающего устройства, не определяет превалирует ли в дефекте смешенного характера (теплового и электрического) нагрев или искрение. Определение дефектов смешенного характера предусмотрено только у методов номограмм и Дюваля. Лучшими по точности распознавания признаны методы, не имеющие нераспознаваемых состояний трансформатора - ансамбля газов, номограмм и Дюваля. В целом же, точность лучших методов, по выявлению дефектов, перечисленных в таблице 1, не превосходит 65%. Если считать правильным распознаванием, когда методы верно определяют носит дефект тепловой или электрический характер, то доля распознанных дефектов у методов ансамбля газов, номограмм и Дюваля возрастет до 74%.

Полученный результат не противоречит тому, что, по мнению экспертов, АРГ позволяет выявить более 80% дефектов трансформатор (по данным Дюваля - это 96%). Дело в том, что обнаружение развивающихся дефектов по результатам АРГ происходит по критерию превышения граничных значений концентрациями газов и скоростями их роста. Мы же тестировали точность идентификации вида дефекта шестью наиболее известными и применяемыми методами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. IEEE Std C57.10-2008 Руководящий документ американского института инженеров электриков и электронщиков по интерпретации газов, которые образуются в маслонаполненных трансформаторах.
2. РД 153 34.0 46.302 00 «Методические указания по диагностике развивающихся дефектов трансформаторного оборудования по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле, в качестве стандарта организации с правом применения в ДЗО ПАО «Россети».
3. МЭК 60599 (2015). Электрооборудование, наполненное минеральным маслом, находящееся в эксплуатации. Руководство по интерпретации результатов анализа растворённых и свободных газов.
4. РД 34.46.302-89 «Методические указания по диагностике развивающихся дефектов по результатам хроматографического анализа газов, растворенных в масле силовых трансформаторов. СПО», Союзтехэнерго, 1989.
6. Duval M. Analyse des Gaz Dissous : Nouveaux Defis, Applictions Nouvelles.// Electra № 133, S 38-45, 1993
7. Michael Duval «A review of faults detectable by gas-in-oil analysis in transformers», IEEE Electrical Insulation Magazine, May/June 2002 – Vol. 18, #3, pp. 8-17.