

УДК 621.31

EDN [POPWPO](#)



## Анализ методов хроматографического анализа растворенных газов в масле силовых трансформаторах

**Е.В. Марков\***

Тольяттинский государственный университет, ул. Белорусская, 14, Тольятти,  
445020, Россия

\*E-mail: [markovevg@yandex.ru](mailto:markovevg@yandex.ru)

**Аннотация.** Хроматографический анализ растворенных газов (ХАРГ) в масле трансформаторов дает представление о тепловых и электрических нагрузках, происходящих в силовых трансформаторах. Известно, что ХАРГ обнаруживает развивающиеся дефекты трансформатора и может помочь предотвратить дальнейшие повреждения. Рассмотрены методы, разработанные для анализа газов и интерпретации их значения: метод «ключевого» газа, коэффициент Дорненбурга, коэффициент Роджерса, метод номограмм, стандарт МЭК 60599, треугольник Дюваля и метод CIGRE. В исследовании сравнивается эффективность этих методов для интерпретации состояния силового трансформатора.

**Ключевые слова:** ХАРГ, силовые трансформаторы, диагностика дефектов.

## Analysis of methods for chromatographic analysis of dissolved gases in oil in power transformers

**E.V. Markov\***

Tolyatti State University, 14 Belorusskaya Street, Tolyatti, 445020, Russia

\*E-mail: [markovevg@yandex.ru](mailto:markovevg@yandex.ru)

**Abstract.** Chromatographic Analysis of Dissolved Gases (DGA) in transformer oil provides insight into the thermal and electrical stresses that occur in power transformers. DGA is known to detect developing transformer defects and can help prevent further damage. The methods developed for the analysis of gases and the interpretation of their values are considered: the key gas method, the Dornenburg coefficient, the Rogers coefficient, the nomogram method, the IEC 60599 standard, the Duval triangle and the CIGRE method. The study compares the effectiveness of these methods for interpreting the state of a power transformer.

**Keywords:** DGA, power transformers, defect diagnostics.

## 1. Введение

Силовые масляные трансформаторы являются основным оборудованием системы электроснабжения. Их надежность влияет не только на электроснабжение потребителей, но и на экономичность работы крупных промышленных предприятий. Различные виды термических и электрических нагрузок часто приводят к внутреннему старению трансформатора и возникновению в нем развивающихся дефектов.

Система изоляции, используемая в силовых трансформаторах, представляет собой комбинацию жидкого трансформаторного масла и твердой пропитанной целлюлозы. Ухудшение изоляции и старение являются двумя основными причинами развивающихся дефектов. Основными причинами старения и износа изоляции являются термические напряжения, электрические напряжения, механические напряжения и влажность. С помощью ХАРГ можно оценить процесс старения и деструкции бумажной изоляции, трансформаторного масла, измерение степени полимеризации и анализ фурановых соединений.

Следует отметить, что определение значения степени полимеризации ( $DP$ ) целлюлозы является стандартным методом количественной оценки деградации целлюлозы. Значение  $DP$  указывает на среднюю длину полимера молекул целлюлозы. Когда целлюлоза стареет из-за термического воздействия, молекулярные цепи разрываются. Ускоренное старение приводит к тому, что бумага становится хрупкой и теряет свою механическую стойкость. Главный недостаток данного метода – необходимость брать пробу бумаги с трансформатора изнутри. Соответственно это может быть выполнено только квалифицированным обслуживающим персоналом, а трансформатор должен быть выведен из эксплуатации. Пробу не следует брать изнутри обмотки, обычно ее берут из высоковольтных отводов в верхней части трансформатора.

Известно, что в целлюлозных материалах старение, вызванное тепловым воздействием, приводит к образованию фурановых соединений в качестве продукта разложения. Эти соединения представляют собой семейство химических веществ, отличающихся стабильностью и скоростью образования. Поскольку эти соединения растворяются в масле, их можно обнаружить и изучить стандартными аналитическими методами. Наблюдаемые взаимосвязи между  $DP$  и различными концентрациями фурановых соединений позволяют косвенно измерить старение целлюлозы. Однако измерения осложняются тем, что разные фураны образуются из разных видов бумаги, а концентрация зависит от массового соотношения масла и целлюлозы. Кроме того,

стабильность соединений неясна при типичных температурах трансформатора и концентрациях растворенного кислорода. Поэтому необходимы дальнейшие исследования, чтобы определить весь потенциал анализа фурановых соединений.

Из существующих методов диагностики развивающихся дефектов, ХАРГ наиболее широко используется для определения неисправностей силовых трансформаторов. Обнаружение определенных газов, образующихся и растворяющихся в работающих силовых трансформаторах, часто является первым признаком неисправности, которую, если ее не устранить, может в конечном итоге привести к выходу из строя силового трансформатора.

Следует обратить внимание, что газы, образующиеся в маслонаполненных трансформаторах, могут быть использованы для качественного определения типов дефектов, поскольку газы являются типичными или преобладающими при различных температурах. В процессе исследования были рассмотрены различные методы ХАРГ, используемые различными организациями и предприятиями для контроля состояния масла и бумажной изоляции.

## 2. Методы ХАРГ

Известно, что ХАРГ [1-8] является одним из наиболее распространенных методов, используемых для оперативной диагностики развивающихся дефектов, поскольку нет необходимости выводить из работы силовой трансформатор. ХАРГ требует регулярного отбора проб масла и современные системы оперативного мониторинга газа. Ключевым шагом в использовании анализа газов для обнаружения дефектов является правильная диагностика дефекта, вызвавшего образование газов. Аномальные электрические или термические напряжения вызывают разрушение бумажной изоляции и приводят к газообразованию. Состав этих газов зависит от типа дефекта. Обнаружение определенного уровня газов, образующихся в маслонаполненном трансформаторе при эксплуатации, часто является первым признаком неисправности, который может привести к выходу из строя трансформатора, если его не устранить. Возможные механизмы газообразования включают искрение, коронный разряд, перегрев изоляции из-за сильной перегрузки и выхода из строя системы принудительного охлаждения. Дефекты силовых масляных трансформаторов можно идентифицировать по образующимся газам и газам, которые являются типичными или преобладающими при различных температурах. Характерными газами развивающихся дефектов являются

водород ( $H_2$ ), метан ( $CH_4$ ), этилен ( $C_2H_4$ ), этан ( $C_2H_6$ ), ацетилен ( $C_2H_2$ ), монооксид углерода ( $CO$ ) и диоксид углерода ( $CO_2$ ). Каждый тип дефекта выделяет газы, которые обычно являются горючими. Увеличение общего количества горючих газов (СУГ), которое коррелирует с увеличением скорости газообразования, может указывать на наличие одного или нескольких тепловых, электрических или коронных дефектов.

Следует отметить, что схемы интерпретации ХАРГ основаны на эмпирических предположениях и практических знаниях, собранных экспертами по всему миру. Тем не менее, следует применять схемы интерпретации с осторожностью, поскольку они указывают только на возможные дефекты.

Как правило, схемы интерпретации, основаны на определенных принципах, таких как концентрации газов, ключевые газы, отношение ключевых газов и графическое представление. Общие методы, представленные в стандарте *IEEE C57.104-2008*, включают в себя: метод «ключевого» газа, коэффициент Дорненбурга, коэффициент Роджерса, метод номограмм, стандарт МЭК 60599, треугольник Дюваля и метод *CIGRE*. В данном исследовании изучались и анализировались семь современных методов диагностики силовых трансформаторов по результатам ХАРГ.

### 3. Метод «ключевого» газа

Метод «ключевого» газа [1], [2] анализирует газы, выделяющиеся из трансформаторного масла после внутреннего дефекта. Данный метод обнаруживает дефекты путем измерения отдельных газов, а не путем расчета соотношения газов. Значительная часть и доля газов называются «ключевыми газами».

Следует отметить, что данный метод обеспечивает первое указание на проблему, соответственно является наиболее важным и наиболее часто выполняемым. Основными продуктами деструкции масла являются газы, полностью или частично растворенные в масле в условиях тепловых и электрических нагрузок, вызванных пусковыми токами в трансформаторах. Углеводородные молекулы минерального масла разлагаются с образованием активного водорода и углеводородных фрагментов, которые затем объединяются в газы, такие как  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$  и т. д. Газы, образующиеся в трансформаторном масле могут быть сгруппированы как:

- углеводороды и водород ( $CH_4$ ,  $C_2H_2$ ,  $C_2H_4$ ,  $C_2H_6$ ,  $H_2$ );
- оксиды углерода ( $CO$ ,  $CO_2$ );
- нормальные газы ( $N_2$ ,  $O_2$ ).

Известно, что данный метод идентифицирует дефекты в соответствии с наличием и процентным содержанием каждого ключевого газа. Он интерпретирует результаты ХАРГ на основе простого набора фактов. Например, частичный разряд низкой интенсивности (ЧР) или коронный разряд в основном производят  $H_2$  со следами некоторых углеводородных газов, поэтому ключевым газом для частичного разряда или коронного разряда является  $H_2$ .

Метод ключевых газов связывает ключевые газы с типами дефектов и выделяет четыре типа дефектов: перегрев масла, перегрев целлюлозы, коронный разряд (частичный разряд) и искрение. Типы дефектов определяются концентрациями основных газов ( $C_2H_4$ ,  $CO$ ,  $H_2$ ,  $C_2H_2$ ), выраженными в *ppm*. Предлагаемые взаимосвязи между ключевыми газами и типами дефектов резюмируются следующим образом:

- $O_2$  и  $N_2$ : нормальное состояние;
- $CH_4$  и  $C_2H_6$ : низкотемпературный перегрев масла;
- $C_2H_4$ : высокотемпературный перегрев масла;
- $CO$  и  $CO_2$ : перегрев целлюлозной изоляции;
- $H_2$ : коронный разряд;
- $C_2H_2$ : искрение.

Поскольку метод ключевого газа не дает численных корреляций между типами дефектов и типами газа, для точной диагностики требуется большой опыт.

#### 4. Метод коэффициента Дорненбурга

Для удобной диагностики дефектов в методах соотношения газов используются схемы кодирования, которые присваивают определенные комбинации кодов конкретным типам дефектов. Коды генерируются путем расчета соотношений концентраций газов и сравнения этих соотношений с predetermined значениями, полученными на основе опыта. Дефект определяется, когда комбинация газов соответствует коду конкретного дефекта.

Отличительной чертой метода коэффициента Дорненбурга [3] является выявление дефектов путем анализа таких отношений концентраций газов, как  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_2/CH_4$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  и  $C_2H_2/C_2H_4$ , которые можно использовать для выявления тепловых дефектов, коронного разряда и искрения. Метод Дорненбурга основан на принципах термического разложения. В рассмотренном методе процедура соотношения

считается верной, если концентрации газа (*ppm*) для  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $C_2H_2$  и  $C_2H_4$  превышают вдвое значение установленного предела для каждого газа и если концентрация  $CO$  и  $C_2H_6$  превышает значение установленного предела в три раза. Чтобы определить достоверность четырех соотношений, каждое последующее соотношение сравнивается с определенными значениями. Следовательно, если все четыре последовательных соотношения для определенного типа дефекта находятся в пределах заданных значений, то дефект подтверждается.

## 5. Метод коэффициента Роджерса

Согласно статистике, наиболее распространенным методом газового соотношения является метод коэффициента Роджерса [4], который рассматривает больше типов тепловых дефектов по сравнению с методом коэффициента Дорненбурга [3]. Метод Роджерса анализирует четыре типа соотношения газов:  $CH_4/H_2$ ,  $C_2H_6/CH_4$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$  и  $C_2H_2/C_2H_4$ . К числу достоинств метода относится, что дефекты диагностируются с помощью простой схемы кодирования, основанной на диапазонах передаточных чисел. Коэффициент Роджерса представляет собой простую схему, основанную на диапазонах коэффициентов, используемых для диагностики дефектов. Согласно методу, определяется четыре состояния силового масляного трансформатора: нормальное старение, частичный разряд, а также электрические и тепловые дефекты различной степени тяжести. Следует отметить эффективность метода, так как он сопоставляет результаты многочисленных исследований отказов с газовым анализом каждого случая. Однако наряду с достоинствами метода [4], в нем присутствуют следующие недостатки:

- некоторые значения соотношений газов не соответствуют диагностическим кодам, присвоенным различным неисправностям.
- поскольку метод не учитывает растворенные газы ниже нормальных значений концентрации, возможно неправильное интерпретирование данных.

## 6. Номографический метод

Достоинством номографического метода [5] является повышение точности диагностики дефектов за счет сочетания отношений газов неисправности и концепции порога ключевого газа. Благодаря графическому представлению данных о дефектном газе упрощается интерпретация данных. Номограмма представляет собой ряд вертикальных логарифмических шкал для представления концентрации отдельных газов

в виде прямых линий, проведенных между соседними шкалами. Линии соединяют точки, представляющие значения концентраций отдельных газов. Прямые линии являются диагностическим критерием для определения типа дефекта. Типы дефектов идентифицируются путем визуального сравнения наклонов отрезков линий с ключами в нижней части номограммы. Серьезность дефекта определяется положением линий относительно шкал концентрации. Пороговое значение каждой вертикальной шкалы указано стрелкой. Чтобы наклон линии считался значительным, по крайней мере одна из двух связующих точек должна превышать пороговое значение. Дефект не считается существенным, если связующая точка лежит выше порогового значения.

### 7. Метод соотношения МЭК

Метод соотношений МЭК [5] напоминает метод коэффициентов Роджерса, но исключает отношение  $C_2H_6/CH_4$ , что указывает лишь на ограниченный температурный диапазон диагностики разложения масляно-бумажной изоляции. Известно, что оставшиеся три соотношения газов имеют разные диапазоны кода по сравнению с методом коэффициентов Роджерса. Схема диагностики дефектов, рекомендованная Международной электротехнической комиссией (МЭК), была основана на методе Роджерса. В методе рассматриваются четыре состояния: нормальное старение, частичные разряды с низкой и высокой плотностью энергии, тепловые дефекты и электрические дефекты различной степени тяжести. Недостатком метода является отсутствие классификации тепловых и электрических дефектов по точным подтипам. Известно, что первая версия метода МЭК (МЭК 60599-1978) основана на простой схеме кодирования, а вторая версия (МЭК 60599-1999) напрямую использует пересмотренные диапазоны отношений. Достоинством второй версии метода МЭК является трехмерное графическое представление диапазонов отношений. Дефекты, которые не могут быть диагностированы, наносятся на график, чтобы можно было наблюдать их положение до определенной области дефекта.

### 8. Метод треугольника Дюваля

Метод треугольника Дюваля [6-7] использует значения только трех газов  $CH_4$ ,  $C_2H_4$  и  $C_2H_2$  и их расположение на треугольной карте. Чтобы построить треугольник, газы преобразуются в треугольные координаты. В рассматриваемом методе, тремя обнаруживаемыми типами неисправностей являются частичные разряды, электрические дефекты (дуговые разряды высокой и низкой энергии) и тепловые дефекты. Принимая

во внимание относительную простоту метода Дюваля, следует понимать, что неквалифицированное использование метода может привести к ложным результатам, поскольку ни одна область треугольника не обозначена как пример нормального старения. Следовательно, прежде чем использовать метод Дюваля для анализа трансформаторов, находящихся в эксплуатации много лет, необходимо определить допустимое количество растворенных газов.

## 9. Метод *CIGRE*

Метод *CIGRE* [8] диагностики дефектов анализирует ключевые газовые соотношения и концентрации газов. В этом методе учитываются пять ключевых соотношений газов:  $C_2H_2/C_2H_6$ ,  $H_2/CH_4$ ,  $C_2H_4/C_2H_6$ ,  $C_2H_2/H_2$  и  $CO/CO_2$ . Ключевыми концентрациями газов являются  $C_2H_2$ ,  $H_2$ , сумма оксидов углерода,  $CO$  и  $CO_2$ . Предлагаемые диапазоны соотношений и пределы концентраций были опубликованы ранее в [8]. Преимущество данного метода в том, что одновременно можно обнаружить две и более неисправности.

С 1999 г. Целевая группа *CIGRE* 15.01.01 рассматривала отклонения и несоответствия между различными схемами интерпретации. В результате исследования, путем сбора экспертных знаний и внесения некоторых корректировок метод интерпретации ХАРГ, предложенный *CIGRE*, модифицирует предыдущие схемы интерпретации для повышения надежности диагностики дефектов. Двухэтапная схема интерпретации *CIGRE* анализирует ключевые соотношения концентраций газа и ключевых концентраций газа и сравнивает их с пороговыми значениями. Затем эти результаты объединяют для диагностики дефектов и определения корректирующих действий.

## 10. Выводы

Основные результаты исследования заключаются в проведенном анализе и сопоставлении семи наиболее распространенных методов ХАРГ для интерпретации дефектов: метод «ключевого» газа, коэффициент Дорненбурга, коэффициент Роджерса, метод номограмм, стандарт МЭК 60599, треугольник Дюваля и метод *CIGRE*. Путем сравнения соответствия и точности каждого метода прогнозирования дефектов, данное исследование показывает важность применения ХАРГ для диагностики дефектов силовых масляных трансформаторов. Полученные результаты, могут быть использованы для диагностики дефектов трансформатора исследователями и



инженерами-испытателями.

Полученные результаты, позволяют сделать вывод о том, что использование нескольких методов ХАРГ, например, метода «ключевого» газа, метода коэффициента Роджерса, метода скорости образования газа и других отраслевых стандартов, для анализа дефектов трансформатора может привести к противоречивым интерпретациям дефектов. Поэтому оптимизация сочетания различных диагностических методик является важным вопросом.

Резюмируя предшествующие рассуждения, можно сказать, что различные подходы к испытаниям трансформаторов, например, ХАРГ, термический анализ, анализ частотных характеристик и анализ частичных разрядов, также имеют свои преимущества и недостатки, что усложняет выбор методов диагностики. Таким образом, более интуитивный подход заключается в объединении результатов, полученных из всех основных методов диагностики, и интеграции их данных в общую оценку.

### Список литературы

1. Committee, T. IEEE Guide for the Interpretation of Gases Generated in Oil-Immersed Transformers / T. Committee, I. Power, E. Society // IEEE StandARcd C57.104-2008. – 2009.
2. Guide for the sampling of gases and of oil-filled electrical equipment and for the analysis of free and dissolved gases // IEC Standard 60567. – 2005.
3. Dornenburg, E. Monitoring Oil Cooling Transformers by Gas Analysis / E. Dornenburg, W. Strittmater // Brown Boveri Review. – 1974. – Vol. 61. – P. 238-247.
4. Rogers, R.R. IEEE and IEC codes to interpret incipient faults in transformers using gas in oil analysis / R. R. Rogers // IEEE Transactions on Electrical Insulation. – 1978. – P. 349-354.
5. Mineral oil-impregnated electrical equipment in service-guide to the interpretation of dissolved and free gases analysis // IEC Standard 60599. – 2007.
6. Duval, M.A. Review of fault detectable by gas-in-oil analysis in transformers / M. A. Duval // IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2002. – P. 8-17.
7. Duval, M. Improving the reliability of transformer gas-in-oil diagnosis // M. Duval, J. Dukarm/ IEEE Electrical Insulation Magazine. – 2005. – P. 21-27.
8. Mollmann, A. New guideline for interpretation of dissolved gas analysis in oil filled transformers // A. Mollmann, B. Pahlavanpour / Electra. – 1999. – P. 31-51.