

МЕТОДЫ И ПРИБОРЫ КОНТРОЛЯ И ДИАГНОСТИКИ МАТЕРИАЛОВ, ИЗДЕЛИЙ, ВЕЩЕСТВ И ПРИРОДНОЙ СРЕДЫ



УДК 621.314.21

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-5-3-12

МЕТОДЫ АНАЛИЗА ГАЗА В МИНЕРАЛЬНЫХ И ЭФИРНЫХ МАСЛАХ ДЛЯ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Хиллес Ферас Е.С., Хизбуллин Р.Н.

Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
bioferas2020@gmail.com, Robert.Khizbullin@mail.ru

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В последнее время все чаще используются силовые трансформаторы с минеральным биоразлагаемым изоляционным маслом, поскольку оно экологически безопасно и биоразлагаемо. Силовые трансформаторы являются основным и крайне важным оборудованием в электроэнергетических системах. МЕТОДЫ. Для стабильной работы системы особое значение имеют методы диагностики. В газовом анализе (ГА) минерального масла существуют свои методы диагностики, которые нельзя напрямую применять для других масел. РЕЗУЛЬТАТЫ. Рассмотрена взаимосвязь между газовыделением и деструктивными процессами, протекающими в минеральном масле. В данном исследовании были проведены испытания на локальный нагрев, частичный разряд и дуговой разряд в масле для изучения газообразования при этих условиях. На основе полученных результатов обсуждались механизмы газообразования в зависимости от температуры нагрева, энергии разряда и других факторов. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Предложенные в данной работе методы, основанные на экспериментальных данных, имеют важное значение, так как указывают перспективные направления диагностики минеральных масел. Точность этих методов может быть повышена за счет оптимизации с использованием данных эксплуатируемых трансформаторов.

Ключевые слова: минеральное масло; газовый анализ; частичный разряд; газообразование; пиролиз; хроматографический анализ газов.

Для цитирования: Хиллес Ферас Е.С., Хизбуллин Р.Н. Методы анализа газа в минеральных и эфирных маслах для силовых трансформаторов // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 5. С. 3-12. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-3-12.

METHODS OF GAS ANALYSIS IN MINERAL AND ESSENTIAL OILS FOR POWER TRANSFORMERS

Hilles Feras E.S., Khizbullin R.N.

Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia
bioferas2020@gmail.com, Robert.Khizbullin@mail.ru

Abstract: RELEVANCE. Recently, power transformers with mineral biodegradable insulating oil have been increasingly used, since it is environmentally friendly and biodegradable. Power transformers are the main and extremely important equipment in electric power systems. METHODS. Diagnostic methods are of particular importance for the stable operation of the system. Gas analysis (GA) of mineral oil has its own diagnostic methods that cannot be directly applied to other oils. RESULTS. The relationship between gas evolution and destructive processes

occurring in mineral oil is considered. In this study, tests were carried out for local heating, partial discharge and arc discharge in oil to study gas formation under these conditions. Based on the results obtained, gas formation mechanisms were discussed depending on the heating temperature, discharge energy and other factors. CONCLUSION. The methods proposed in this paper, based on experimental data, are important, since they indicate promising areas for diagnosing mineral oils. The accuracy of these methods can be improved by optimization using data from operating transformers.

Keywords: mineral oil; gas analysis; partial discharge; gas formation; pyrolysis; gas chromatographic analysis.

For citation: Hilles Feras E.S., Khizbulin R.N. Methods of gas analysis in mineral and essential oils for power transformers. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (5): 3-12. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-5-3-12.

Введение (Introduction)

Электротехническое оборудование, заполненное энергетическим маслом, является основным компонентом промышленных предприятий, осуществляющих производство и передачу электроэнергии различным потребителям. В процессе эксплуатации трансформаторного оборудования под влиянием высокой температуры и негативных факторов окружающей природной среды энергетические масла окисляются с образованием различных продуктов, к числу которых относятся газообразные вещества, такие как метан, ацетилен, этилен оксид углерода и другие, накопление которых в замкнутой системе может привести к взрыву и выводу из эксплуатации силовых трансформаторов [1-2]. Кроме того, в процессе эксплуатации маслонаполненного электрооборудования происходит разрушение бумажной изоляции с образованием фурановых соединений, которые попадают в трансформаторное масло и их содержание определяют различными инструментальными методами для проведения диагностических процедур [3-4].

Для продления срока эксплуатации энергетического масла в него вводят антиокислительную присадку, в качестве которой наиболее часто используют «Ионол» [5]. При этом большое значение придается извлечению антиокислительной присадки из трансформаторного масла с использованием жидкостной экстракции органическими растворителями [6-8].

Электроизоляционное масло, используемое в трансформаторах, в основном обладает следующими основными эксплуатационными характеристиками [1, 9]:

- А. высокое напряжение пробоя и хорошее объемное удельное сопротивление;
- Б. должен обладать низкой вязкостью и отличными охлаждающими свойствами;
- С. должен обладать отличной устойчивостью к воздействию кислорода и тепла и химически стабилен;
- Д. не вызывать коррозии металлов и других компонентов.

Существует три основных компонента: углеводороды на основе парафина с углеродной цепью, соединенной в цепочку, углеводороды на базе нафтина, соединенные в кольцо, и ароматические углеводороды с бензольным кольцом. Минеральное масло получают путем переработки сырой нефти, используемой в качестве сырья. В ходе переработки *n*-парафин и полициклические ароматические вещества в умеренной степени удаляются с помощью таких процессов, как депарафинизация, экстракция растворителем и гидрирование, поскольку не углеводородные компоненты, содержащиеся в сырой нефти, также влияют на качество изоляционного масла. Современные минеральные масла используются в электрооборудовании, например, в трансформаторах с масляным охлаждением.

При техническом обслуживании маслонаполненного электротехнического оборудования их состояние контролируется механическими, электрическими и химическими методами на предмет внутренних неисправностей, в дополнение к визуальному осмотру, для заблаговременного предотвращения аварий и раннего обнаружения неисправностей. В дополнение к этому, измеряются свойства самого изоляционного масла, которые используются для управления техническим обслуживанием. Ниже приводится краткое описание метода обнаружения неисправностей масляного трансформатора.

- Обнаружение внутренних неисправностей:
- А. Механические методы

В. Электрический метод

С. Химические способы:

1) измерение свойств изоляционного масла

Из трансформатора отбирают изолирующее масло для измерения содержания влаги, пробивного напряжения, объемного удельного сопротивления, кислотности, цвета и т.д., а также для проверки его пригодности к использованию.

2) анализ содержания газа в масле [10-13]

Исследуются абсолютное количество газа в масле, степень увеличения и относительное соотношение различных компонентов газа, а также выявляется наличие внутренней деструкции.

Поскольку изолирующее масло может быть легко отобрано даже в работающем трансформаторе, а наличие или отсутствие внутренних неисправностей и состояния может быть обнаружено точно и с высокой чувствительностью, анализ содержания газа в масле стал одним из незаменимых методов диагностики и эксплуатации маслонаполненного электрооборудования.

В последние годы получили практическое применение электроизоляционные масла, на растительной основе, которые более экологичны, чем обычные минеральные масла, и их применение постоянно расширяется. Эти изоляционные масла относятся к биоразлагаемым сложноэфирным соединениям, получаемым из растительного сырья и синтетических сложных эфиров, и называются изоляционными маслами на основе сложных эфиров. Эфирные масла с высокой способностью к биологическому разложению характеризуются низкой нагрузкой на окружающую среду. Масла, изготовленные из натуральных сложных эфиров, могут сократить использование нефтяных ресурсов, а также примечательны тем, что не содержат углерода. Несмотря на то, что использование изоляционных масел на основе сложных эфиров с различными характеристиками расширяется с каждым годом, лабораторных и опытно-эксплуатационных данных о технологии диагностики неисправностей недостаточно, и они не достигли того уровня, который может обеспечить стабильное техническое обслуживание, аналогичное минеральному маслу. При внедрении новых технологий анализа важно не только стремиться к количественному показателю испытаний, но и проводить более углубленный теоретический анализ явлений. Для этого необходимо накопить экспериментальные и практические данные и еще больше расширить методы диагностики.

Цель исследования – анализ содержания газа в трансформаторном минеральном масле при частичном, дуговом разрядах и при пиролизе.

Материалы и методы (Materials and methods)

Методы диагностики масляных трансформаторов в основном делится на две части.

Ниже приведены методы диагностики неисправностей, позволяющие определить, происходит ли в данный момент перегрев или разряд внутри трансформатора, и методы диагностики износа при старении, позволяющие определить состояние трансформатора и степень износа, и оставшийся срок службы трансформатора. Первый из них называется анализом газового компонента, содержащегося в изоляционном масле, и наличия или отсутствия ее деструкции, состояния процесса на основе количества, типа, соотношения и т.д. Последний представляет собой способ определения состояния изоляционной бумаги обмотки, что указывает на износ трансформатора, и является методом определения концентраций в масле фурфурола и CO-CO₂, которые являются продуктами разложения при ухудшении свойств изоляционной бумаги. Диагностика используется для оценки степени ухудшения текущего состояния трансформатора и определения приоритетности обновления трансформатора.

В целом, легкость образования соединения может быть определена величиной энергии диссоциации связи. В таблице 1 приведены энергии диссоциации связи C-H и связи C-C. Энергия диссоциации связей C-H и C-C варьируется в зависимости от типа молекулы, и можно видеть, что в связях C-C одинарная связь (C₂H₆), двойная связь (C₂H₄), тройная связь (C₂H₂) возрастает по мере увеличения степени ненасыщенности. Это указывает на то, что соединения с двойными или тройными связями образуются при более высоких температурах, чем C₂H₆ с одинарной связью, и что углеводороды, такие как C₂H₂ с тройной связью, образуются при более высоких температурах, чем C₂H₄ с двойной связью.

Таблица 1
Table 1

Энергия диссоциации связи
Bond dissociation energy

Связь	Молекулы (AB)	Молекулы (A,B)	Энергия диссоциации связи (кДж/моль)
C-H	CH ₄	H, CH ₃	431.8
	CH ₃	H, CH ₂	457
	CH ₂	H, CH	419
	CH	H, C	334.7
	C ₂ H ₂	H, C ₂ H	547
	C ₂ H ₄	H, C ₂ H ₃	417.5
	C ₂ H ₆	H, C ₂ H ₅	414
C-C	C ₂ H ₂	C ₂ H	956.6
	C ₂ H ₄	C ₂ H ₂	719
	C ₂ H ₆	C ₂ H ₃	366.4

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Ряд зарубежных исследователей [9] рассмотрели термодинамический процесс пиролиза (более 900°C) и крекинга (400-500°C) электроизоляционных масел. В этом исследовании газообразование рассматривается в результате реакции пиролиза масла, учитывая, что основной газ, образующийся в трансформаторе, получается в результате разложения электроизоляционного масла. Константы равновесия в реакциях пиролиза парафина, нафтина и ароматических веществ, содержащихся в минеральном масле, рассчитываются по стандартной свободной энергии каждого компонента. Поскольку стандартная свободная энергия изменяется при каждой температуре, можно рассчитать равновесный продукт при каждой температуре. В ходе термодинамического процесса происходит первичная реакция, при которой исходная молекула разлагается, и вторичная реакция, при которой продукт разложения вступает в дальнейшую стадию химического преобразования. Пример расчета состава газа, полученного из C₂₀H₄₂ путем пиролиза, включая вторичное разложение, показан на рисунке 1.

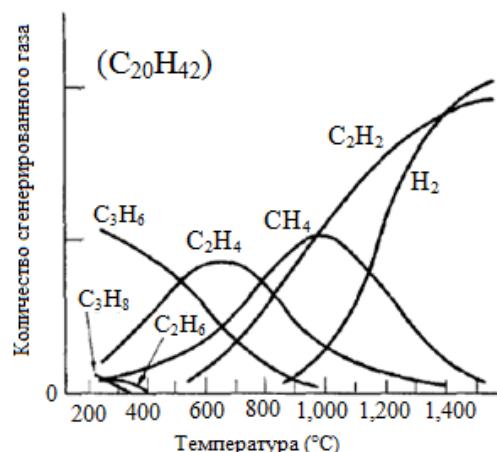


Рис. 1. Состав газов, образующихся из C₂₀H₄₂ в результате пиролиза, включая вторичное разложение

*Источник: [9]. Source: [9].

Основываясь на этих результатах, можем сделать следующие выводы:

1. Пиролиз углеводородов включает в себя первичную и вторичную реакции, и соотношение образования насыщенных углеводородов в первичной реакции и ненасыщенных углеводородов во вторичной реакции велико.

2. При высокой температуре усиливается вторичная реакция, увеличивается содержание метана, этилена, пропилена, а при более высокой температуре образуется ацетилен, и чем выше температура, тем больше увеличивается его количество.

Эти аналитические данные, как правило, полностью согласуются с экспериментальными результатами анализа газов в трансформаторном масле. Анализ газов

в масле используется в качестве одной из теоретических интерпретаций диагностики неисправностей.

Результаты (Results)

Экспериментальные пути определения характеристик газообразования в масле. В дополнение к сбору данных и теоретическому изучению реального оборудования проводится оценка эксперимента, предполагающего наличие внутренней неисправности трансформатора в минеральном масле, и характеристики газа, образующегося в это время. Были получены характеристики газообразования при каждой температуре нагрева, используя устройство, которое локально нагревает масло, пропуская электрический ток через пластины из нержавеющей стали, установленную в масле. Было обнаружено, что соотношение насыщенных и ненасыщенных углеводородов тесно связано с температурой нагрева, и был предложен метод оценки температуры перегрева по соотношению газов (рис. 2).

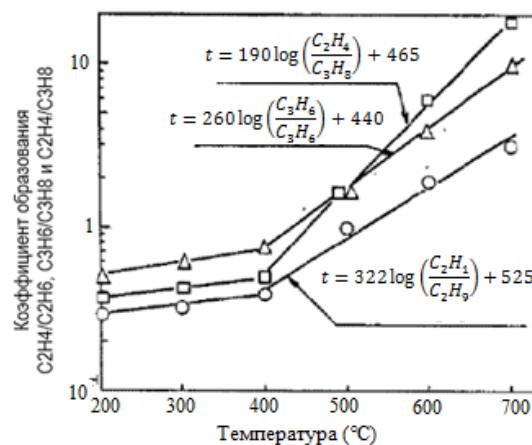


Рис. 2. Температурные характеристики производственных соотношений C_2H_4/C_2H_6 , C_3H_6/C_3H_8 и C_2H_4/C_3H_8

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Эти результаты показывают, что основными газами, образующимися при разряде в минеральном масле, являются H_2 и C_2H_2 соответственно. Результаты этих исследований о количестве заряда в разряде и характеристиках газообразования при частичном разряде приведены на рисунке 3. Из этого результата следует, что в области, где количество разряженного заряда низкое, соотношение водорода велико, C_2H_2 невелик. Можно видеть, что C_2H_2 имеет тенденцию к быстрому увеличению в области, где количество разряженного заряда велико.

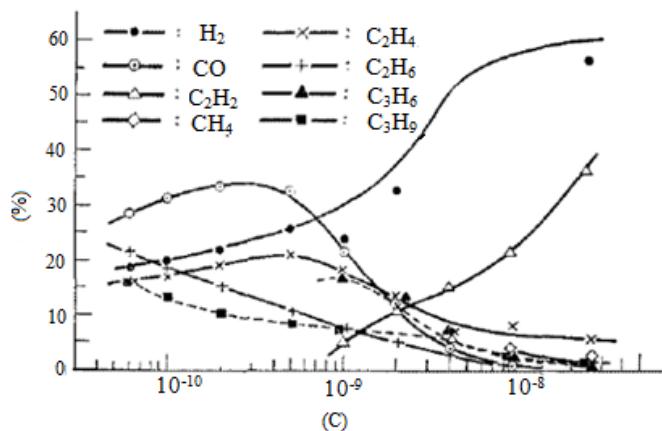


Рис. 3. Средний заряд разряда и газовый состав частичного разряда

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 показан пример разложения газа при дуговом разряде, выполненные в работах [6-8]. Можно видеть, что основными компонентами являются водород и ацетилен.

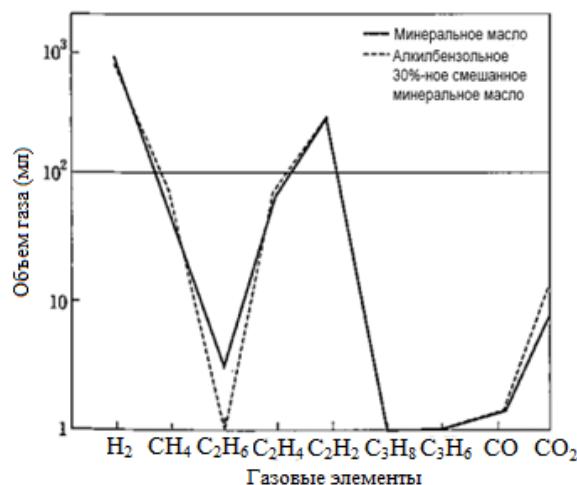


Рис. 4. Пример разложения газа дуговым разрядом в минеральном масле Fig. 4. Example of gas decomposition by arc discharge in mineral oil

*Источник: [6-8]. Source: [6-8].

Анализ газов, выделяющихся из энергетического масла.

1. Принцип газовой хроматографии

Хроматограф – это устройство, разделяющее смеси методом хроматографии. Хроматография – это метод, при котором жидкость (подвижная фаза), содержащая смесь разделяемых компонентов, пропускается через неподвижную фазу с очень большой площадью поверхности, например, через порошок или фильтровальную бумагу, или через неподвижную фазу, удерживающую жидкую фазу на неподвижной фазе, компоненты разделяются из-за разницы в сродстве между неподвижной фазой и подвижной фазой. Сродство между компонентами и неподвижной фазой или подвижной фазой определяется разницей в силах адсорбции/десорбции, двухфазным разделением из-за растворимости, силой ионного обмена и т. д.

Газовый хроматограф – это прибор для инструментального анализа, который применяет колоночную хроматографию для анализа газов и используется для анализа газовых компонентов и высоколетучих жидких компонентов. Газовый хроматограф состоит из колонки, которая разделяет газовые компоненты с использованием принципов хроматографии, детектора, который обнаруживает газовые компоненты, разделенные колонкой, и блока регистрации и обработки данных, который регистрирует выходной сигнал детектора и обрабатывает данные.

Газ-носитель течет с постоянной скоростью потока в приборе газового хроматографа. В качестве газа-носителя обычно используются инертные газы, такие как N₂, He и Ar. Газ-носитель, который поступает в прибор, проходит через трубку, называемую колонкой, заполненную насадочным материалом, проходит через детектор и выпускается наружу. Колонка установлена в терmostатируемой печи и точно контролируется в соответствии с условиями анализа. Когда пробный газ вводится из секции ввода образца, газовые компоненты, содержащиеся в образце, вводятся в колонку вместе с газом-носителем. Газовые компоненты, введенные в колонку, текут к выходу колонки, взаимодействуя с насадочным материалом в колонке. Детектор, который может обнаруживать газовые компоненты, содержащиеся в образце, подключается к выходу колонки, и когда поступает компонент, отличный от газа-носителя, он преобразует его в электрический сигнал, соответствующий его концентрации, и выводит его. Взаимодействие между насадочным материалом и газовыми компонентами, содержащимися в образце, варьируется в зависимости от типа компонента, поэтому время, необходимое для достижения каждым компонентом выхода колонки, варьируется. Детектор выводит электрический сигнал, соответствующий компоненту, который достигает выхода, поэтому, если выход детектора контролируется, выход разделенных компонентов будет записан как пик. Время от введения образца до обнаружения каждого компонента (время удерживания) является постоянным при тех же условиях, поэтому по времени удерживания можно определить, к какому компоненту принадлежит каждый пик. Кроме того, поскольку размер пика

соответствует количеству компонента, можно количественно определить компонент. При анализе газа в масле газ в масле извлекается перед измерением с помощью газовой хроматографии, а извлеченный газ количественно определяется с помощью газовой хроматографии.

Газовая хроматография позволяет определять каждый индивидуальный компонент в масле при их совместном присутствии, поэтому в одном образце обычно измеряют девять компонентов (до газов C_2): N_2 , O_2 , H_2 , CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 , C_2H_2 , CO и CO_2 .

2. Колонки, используемые в анализе газа в масле

Для колонок газового хроматографа материал насадки, внутренний диаметр колонки и длина должны быть выбраны в соответствии с целью анализа. Поскольку характеристики разделения различаются в зависимости от используемой системы, должны быть установлены условия для полного разделения целевого анализа. Для анализа неорганических газов и углеводородных газов, измеряемых в анализе газа в масле, часто используются насадочные колонки, в которых материал насадки упакован в трубы из нержавеющей стали.

3. Детекторы, используемые в анализе газа в масле

На сегодняшний день было объявлено о более чем 30 типах детекторов для газовых хроматографов. В анализе газа в масле анализируются неорганические газы, такие как H_2 , N_2 и O_2 , углеводородные газы, такие как CH_4 , C_2H_6 , C_2H_4 и C_2H_2 , а также CO и CO_2 . Обычно для неорганических газов, CO и CO_2 используется детектор теплопроводности (ДТ), а для углеводородных газов – детектор ионизации водорода (ДИВ). ДТ – это детектор, который использует разницу в теплопроводности газов. Как показано на рисунке 5, постоянный расход газа-носителя всегда течет со стороны R_1 в качестве эталона, а газ, прошедший через колонку, течет со стороны R_2 . Когда газовые компоненты в образце, разделенные колонкой, достигают детектора, между газами, протекающими через R_1 и R_2 , возникает разница в теплопроводности, и газ обнаруживается мостовой схемой. Поскольку ДТ – это детектор, который использует разницу в теплопроводности с газом-носителем, он чувствителен ко всем газам, кроме газа-носителя. В принципе, чем больше разница в теплопроводности с газом-носителем, тем выше чувствительность. Поэтому необходимо выбирать газ-носитель с учетом типа анализируемого газа.

ДИВ обнаруживает ионы, образующиеся при сгорании компонентов в пробе газа, вводимой в пламя водорода. ДИВ может обнаруживать почти все органические вещества и является высокочувствительным детектором для углеводородных газов, с чувствительностью в 10-1000 раз выше, чем у ДТ. Он также имеет широкий динамический диапазон. CO и CO_2 не могут быть обнаружены ДИВ, но они могут быть преобразованы в CH_4 с помощью метанизатора, а затем обнаружены ДИВ для высокочувствительного анализа.

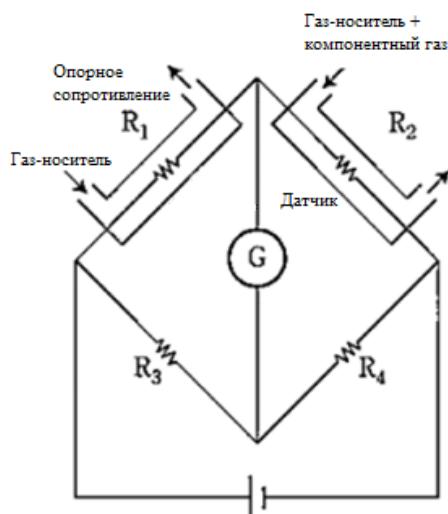


Рис. 5. Детектор по теплопроводности (ДТ)

*Источник: [3]. Source: [3].

Fig. 5. Thermal conductivity detector (TCD)

Диагностика с помощью анализа газа в масле. Данные анализа газа в масле методом газовой хроматографии используются для определения того, является ли трансформатор рабочим или дефектным, уровня дефектности и типа дефектности, используя различные стандартные значения, диагностические методы и диагностические диаграммы. Для

трансформаторов, использующих минеральное масло, были накоплены различные экспериментальные данные, проведен теоретический анализ, а данные анализа газа в масле реальных трансформаторов и проверки фактических ненормальных условий были широко проведены и превратились в методы диагностики дефектов.

Заключение (Conclusions)

В результате проведенного исследования можно сделать следующие выводы.

Техническое обслуживание трансформаторов, и их диагностика, которые являются основным силовым оборудованием, имеют важное значение для стабильной подачи электроэнергии, и это остается верным даже сейчас, когда методы генерации электроэнергии диверсифицируются. Разработанная технология диагностики внутренних отклонений в трансформаторах с помощью анализа газа в энергетическом масле, актуальна и востребована.

Масляные трансформаторы, основа энергетического оборудования, заполнены большим количеством изоляционного масла, и большую часть которого в настоящее время составляет минеральное масло. Минеральное масло, которое производится из нефти, не является материалом, который будет использоваться в дальнесрочной перспективе, поскольку, если его сжигать при утилизации, оно будет выделять большое количество CO₂. Загрязнение окружающей среды также является проблемой, если оно попадет в окружающую среду. Биоразлагаемое (эфирное) изоляционное масло было создано как решение этой проблемы. Оно хорошо поддается биологическому разложению, а те, которые производятся из сырья, такого как растительное масло, могут производиться постоянно и, можно сказать, являются устойчивыми. По этим причинам переход с минерального масла на эфирное масло будет неизбежен, чтобы поддерживать энергосистему надолго и стablyно.

Методы анализа газа в масле, разработанные для минеральных масел, также считаются очень эффективными для эфирных масел. Эфирное масло, будучи органическим веществом, выделяет газ при перегреве и разряде, как и минеральное масло. Анализ газа в масле очень удобен, поскольку он высокочувствителен и может проводиться без остановки трансформатора. Еще одним важным преимуществом является то, что можно использовать то же самое оборудование для отбора проб, методы и аналитические приборы, которые используются для минерального масла. Поэтому, установив технологию анализа газа в масле для эфирных масел и накопив данные, мы считаем, что можно будет обеспечить диагностику внутренних отклонений, аналогичную той, которая использовалась до сих пор.

Как упоминалось выше, технология диагностики эфирного масла все еще находится в стадии разработки. Мы считаем, что все еще не хватает экспериментальных данных и исследований для проверки явления газообразования. Теоретический анализ также необходим. В этом исследовании мы использовали экспериментальное устройство для исследования характеристик газообразования при локальном нагреве, частичном разряде и дуговом разряде, которые являются типичными внутренними дефектами в трансформаторах, генерируемыми в масле. Мы исследовали, как тип и соотношение генерируемого газа изменяются в зависимости от типа дефектов, температуры и энергии разряда. На основе полученных данных мы также увидели показатели, которые можно использовать для диагностики внутренних дефектов.

Литература

1. Липштейн Р. А, Шахнович М.И. Трансформаторное масло. Изд. 3-е, перераб. и доп-м.: Энергоатомиздат, +983, -296с.
2. Gnanasekaran D. Chavidi V.P. Vegetable Oil: An Eop-qriendly dignid Jnsulator, Jn Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids, Springer berlin/ Heidelberg Germany/2018? p.101-124
3. ГОСТ Р МЭК 61198-2013. Масла изоляционные нефтяные. Методы определения 2-фурфурола и родственных соединений. Введ. 01.01.2013. -М.: Стандартинформ. 2013.-69с
4. РД 34.43.206-94. Методика количественного химического анализа. Определение содержание производных фурана в электроизоляционных маслах методом жидкостной хроматографии. М.:ОРГРЭС. +995 -12с.
5. Коробейников С.М, Лютиков М.Н. Исследование технологических операций, влияющих на определение концентрации присадки Ионол изоляционном масле высоковольтного оборудования. Проблемы региональной энергетики, 2018, к 36, р-97-105.
6. Нгуен Дуй Хунг, Снигерева Ю.В, Таинева А.В, Новиков В.Ф Влияние природы органического растворителя на процессы разделения антиокислительной присадки в трансформаторном масле газохроматографическим методом// Известие высших учебных заведений. Проблемы энергетики .2020,т.22, №6,-е.211.220 ДОУ:10.30724/1998-9903-2020-22-6-211-220.

7. Ngok Dan Vu, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Improvement of the gas chromatographic method for diagnosing developing defects in oil-filled electrical equipment based on the analysis of furan compounds // E3s Web of Conferences. SUSE-2021.- V.288.- No. 01080.- 4 P. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801080>

8. N.D. Hung, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Determination of the antioxidant additive "Ionol" in transformer oil by gas chromatographic method. // // E3S Web of Conferences. SUSE-2021. V. 288.- No. 01081 - 4 P <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801081>

9. Цукиока, Ёсиро, Сугавара, Кацую, Оэ, Эцуо, «Поведение разлагающегося газа изоляционного масла из-за локального нагрева», Труды IEEJ по электротехнике, т. 98, № 7, стр. 381-388, 1978 г.

10. Хироши Кувахара, Кейджи Цуруга, Тосицугу Иси, Дзюн Ёсинага, «Генерация газа разрядом в силиконовом масле», Труды Института инженеров-электриков Японии, Vol. 97, № 5, стр. 267-275, 1977.

11. Сёдзи Хираяси, Наонобу Сиоми, Наоя Ямада, Сигэо Шода, «Выработка газа с помощью коронного разряда в масле», Mitsubishi Electric Технический обзор, Vol. 45, № 8, стр. 1025-1023, 1971.

12. Ёсиаки Хитоцубаши, Тосио Котаке, Фумио Савада, Ген Тадзуме, Шун Осава, Сабуро Кумагаи, «Исследование диагностики неисправностей трансформатора (часть 2)», Takaoka Review, том 26, № 89, стр. 188-197, 1979.

13. Японская ассоциация измерений и анализа окружающей среды, Краткое руководство к специалисту по измерениям окружающей среды, том 26. 8, Maruzen, 2007.

Авторы публикации

Хиллес Ферас Е.С. – аспирант кафедры «Электротехнические комплексы и системы» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. bioferas2020@gmail.com

Хизбуллин Роберт Накибович – д-р техн. наук, профессор кафедры «Приборостроение и мехатроника» ФГБОУ ВО «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань, Россия. Robert.Khizbullin@mail.ru

References

1. Lipshteyn R. A, Shakhnovich M. I. Transformer oil. 3rd ed., revised and add-m.: Energoatomizdat, +983, -296 p.

2. Gnanasekaran D. Chavidi V. P. Vegetable Oil: An Eop-qriendly known Jnsulator, Jn Vegetable Oil based Bio-lubricants and Transformer Fluids, Springer berlin/ Heidelberg Germany/2018? p. 101-124

3. GOST R IEC 61198-2013. Insulating petroleum oils. Methods for determination of 2-furfural and related compounds. Introduced 01.01.2013. -M.: Standartinform. 2013.-69s

4. RD 34.43.206-94. Methodology of quantitative chemical analysis. Determination of the content of furan derivatives in electrical insulating oils by liquid chromatography. Moscow: ORGRES. +995 -12s.

5. Korobeynikov S.M., Lyutikov M.N. Study of technological operations affecting the determination of the concentration of the Ionol additive in the insulating oil of high-voltage equipment. Problems of regional energy, 2018, k 36, p-97-105.

6. Nguyen Duy Hung, Snigereva Yu.V., Taneeva A.V., Novikov V.F. Influence of the nature of the organic solvent on the processes of separation of the antioxidant additive in transformer oil by the gas chromatographic method// News of higher educational institutions. Energy problems .2020, vol. 22, no. 6, - e.211.220 DOU: 10.30724/1998-9903-2020-22-6-211-220.

7. Ngok Dan Vu, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Improvement of the gas chromatographic method for diagnosing developing defects in oil-filled electrical equipment based on the analysis of furan compounds // E3s Web of Conferences. SUSE-2021.- V.288.- No. 01080.- 4 P. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801080>

8. N.D. Hung, A.V. Taneeva, V.F. Novikov. Determination of the antioxidant additive "Ionol" in transformer oil by gas chromatographic method. // // E3S Web of Conferences. SUSE-2021. V. 288.- No. 01081 - 4 P <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128801081>

9. Tsukioka, Yoshiro, Sugawara, Katsuo, Oe, Etsuo, "Decomposition Behavior of Insulating Oil Gas Due to Localized Heating", IEEJ Transactions on Electrical Engineering, Vol. 98, No. 7, pp. 381-388, 1978

10. Hiroshi Kuwahara, Keiji Tsuruta, Toshitsugu Ishii, Jun Yoshinaga, "Gas Generation by Discharge in Silicone Oil", Proceedings of the Institute of Electrical Engineers of Japan, Vol. 97, No. 5, pp. 267-275, 1977.

11. Shoji Hirabayashi, Naonobu Shiomi, Naoya Yamada, Shigeo Shoda, "Gas Generation by Corona Discharge in Oil", Mitsubishi Electric Technical Review, Vol. 45, No. 8, pp. 1025-1023, 1971.

12. Yoshiaki Hitotsubashi, Toshio Kotake, Fumio Sawada, Gen Tazume, Shun Osawa, Saburo Kumagai, "Study on Transformer Fault Diagnosis (Part 2)", Takaoka Review, Vol. 26, No. 89, pp. 188-197, 1979.
13. Japan Association for Environmental Measurement and Analysis, Brief Guide to Environmental Measurement Specialist, Vol. 26, No. 8, Maruzen, 2007.

Authors of the publication

Hilles Feras E.S. – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
bioferas2020@gmail.com

Robert N. Khizbulin – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.
Robert.Khizbulin@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено **19.06.2025 г.**

Отредактировано **26.06.2025 г.**

Принято **03.07.2025 г.**