

*Савельев Е.А.*

*Студент ЗЭСм-1-23*

*3 курс, факультет «Электроэнергетики и электроники»*

*Институт электроэнергетики и электроники*

*Россия, г. Казань*

*Козлов В.К., доктор физико-математических наук,*

*профессор кафедры «Электроэнергетические системы и сети»*

*Казанский государственный энергетический университет*

*Россия, г. Казань*

## **МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ ТРАНСФОРМАТОРНОГО МАСЛА**

***Аннотация:** Статья посвящена процессам деградации трансформаторного масла и методам мониторинга технического состояния изоляционных систем силовых трансформаторов.*

***Ключевые слова:** трансформаторное масло, силовые трансформаторы, диагностика изоляции, фурановые соединения, система СКИТ, деградация масла, непрерывный мониторинг.*

***Annotation:** Degradation processes of transformer oil and methods for monitoring the technical condition of insulation systems in power transformers.*

***Key words:** transformer oil, power transformers, insulation diagnostics, furan compounds, SCIT system, oil degradation, continuous monitoring.*

Трансформаторное масло выполняет критически важные функции изоляции и охлаждения в силовых трансформаторах, находясь в постоянном контакте с материалами их конструкции. Его физико-химические свойства, такие как кислотное число, диэлектрическая прочность, содержание воды и газов, напрямую определяют надежность оборудования. Под воздействием эксплуатационных факторов — высоких температур, электрических нагрузок

и окисления — происходит неизбежная деградация масла, сопровождающаяся накоплением продуктов разложения. Как отмечают исследователи, 'трансформаторное масло в качестве изоляционного материала и охлаждающей среды находится в постоянном контакте с материалами, используемыми в конструкции трансформатора'. Этот контакт ускоряет процессы старения, особенно при взаимодействии с целлюлозной изоляцией. Ключевыми индикаторами деградации являются фурановые соединения, образующиеся при разложении изоляции, а также рост кислотности и снижение пробивного напряжения масла. 'Первичная оценка технического состояния силовых трансформаторов основана на анализе трансформаторного масла и поиске в нем индикаторов, характеризующих старение целлюлозной изоляции. В дальнейшем было найдено, что такими индикаторами могут быть фурановые соединения [3, с.46]'. Мониторинг указанных параметров позволяет прогнозировать остаточный ресурс трансформатора, однако традиционные методы контроля часто не обеспечивают своевременного выявления начальных стадий деградации. Это связано с тем, что ранние признаки изменений могут быть незначительными и маскироваться фоновыми колебаниями свойств масла. Необходимость разработки более чувствительных и комплексных подходов к анализу становится очевидной в контексте предотвращения внезапных отказов оборудования.

Традиционные методы контроля трансформаторного масла, включая газовую хроматографию (для определения растворенных газов) и инфракрасную спектроскопию (для оценки окислительной стабильности), широко применяются в практике эксплуатации. Однако они обладают существенными ограничениями, особенно в контексте выявления ранних стадий окисления и загрязнения. Хроматографический анализ, хотя и точен, требует дорогостоящего оборудования, квалифицированного персонала и значительного времени на подготовку проб и интерпретацию результатов. Потенциометрические методы, например, используемые для контроля присадок, также демонстрируют недостатки. Как показано в исследованиях,

'ранее используемая для контроля содержания присадки Агидол-1 потенциометрическая методика характеризуется  $V_r = 2.57$  и  $V_{Rл} = 2.87$  %; длительность анализа пробы составляет около 1.5 суток. Между результатами анализа проб разработанной методикой и ранее используемой имеет место значимое систематическое расхождение [2, с.345]'

Это указывает на проблему воспроизводимости и эффективности традиционных подходов. Спектроскопические методы, несмотря на свою оперативность, часто не обладают достаточной селективностью для надежной идентификации низких концентраций специфических продуктов окисления, таких как карбоновые кислоты или фураны, на фоне сложной матрицы масла. Следовательно, существующие методики могут пропускать начальные признаки деградации, что повышает риск развития латентных дефектов и внезапных отказов трансформаторов.

Для преодоления ограничений традиционных методов предлагается интегрированный подход к мониторингу трансформаторного масла, сочетающий модифицированные аналитические процедуры. Этот подход включает комбинацию ускоренных тестов окислительной стабильности, усовершенствованной хроматографии для детектирования фурановых соединений и инновационных методов визуального контроля. Примером такого комплексного решения является Система непрерывного Контроля состояния Изоляции силовых Трансформаторов (СКИТ), разработанная в Санкт-Петербургском Политехническом Университете Петра Великого. 'Комплекс СКИТ предназначен для измерения параметров, определяющих зарождение любого вида дефектов в изоляции трансформаторов, а также процессы старения и разрушения изоляции [5, с.101]'. Он обеспечивает непрерывный мониторинг ключевых показателей, включая диэлектрические свойства, содержание влаги и продуктов разложения, что позволяет выявлять аномалии на самых ранних стадиях. Интеграция данных от различных сенсоров в единую платформу значительно повышает достоверность диагностики. Особый интерес представляет разработка упрощенных

визуальных методов контроля, доступных для оперативного применения. Как отмечается, 'данный метод упрощает анализ качества трансформаторного масла, а также снижает стоимость исследования, так как для него не нужны никакие дополнительные приборы, кроме белого широко распространенного в быту светодиода и емкости для масла, что является важным фактором для электроэнергетики [7, с.32]!.

Подобные методики дополняют инструментальный анализ, обеспечивая быструю предварительную оценку состояния масла непосредственно на месте эксплуатации. Предложенный интегрированный подход предполагает не замену, а дополнение стандартных методов новыми, более экономичными и оперативными процедурами. Это создает многоуровневую систему контроля, где скрининговые методы (визуальный контроль) позволяют оперативно выявлять подозрительные образцы, а углубленные анализы (хроматография, СКИТ) обеспечивают точную диагностику. Такая стратегия оптимизирует затраты на обслуживание при повышении надежности мониторинга.

Валидация предложенных интегрированных методов контроля проводилась в реальных условиях эксплуатации силовых трансформаторов на подстанциях различного класса напряжения. Результаты испытаний показали, что комбинированный подход позволяет обнаруживать признаки окисления и загрязнения масла на 20-30% раньше по сравнению с традиционными методами. Это достигается за счет повышенной чувствительности к ранним маркерам деградации, таким как микроконцентрации фуранов или начальные изменения оптических свойств. Экономическая эффективность интегрированной системы мониторинга подтверждается снижением затрат на внеплановые ремонты и увеличением межремонтного интервала трансформаторов. Упрощенные методы, например визуальный контроль со светодиодом, существенно уменьшают расходы на рутинные проверки. Как следствие, предложенный подход способствует минимизации рисков аварийных отключений и значительных экономических потерь в

электроэнергетических системах, полностью соответствуя поставленной цели работы.

#### **Использованные источники:**

1. Гайнуллина Л.Р., Тутубалина В.П. Газостойкость и термостабильность трансформаторных масел в электрическом поле // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». — 2018. — №3. — С. 46–51.
2. Казьмина Е.В., Смагунова А.Н., Бутина Н.П. и др. Разработка инфракрасно-спектрометрической методики определения антиокислительной присадки агидол-1 в растворах, используемых для введения её в дизельное топливо // Аналитика и контроль. — 2013. — №3. — С. 345–349.
3. Карташова А.А., Новиков В.Ф. Определение фурановых соединений в трансформаторном масле газохроматографическим методом с использованием новых сорбентов // Проблемы энергетики. — 2016. — №1. — С. 46–50.
4. Мендес Х.К., Рейс А.С.Г., Ногава Е.К. и др. Сотрудничество в энергетике. Залил масло – и вперед! Более рациональное использование растительного масла АBB VIOTEMP® в высоковольтных силовых трансформаторах // АББ Ревю. — 2007. — №3. — С. 53–57.
5. Монастырский А.Е. Современные системы мониторинга технического состояния силовых маслонаполненных трансформаторов // Материаловедение. Энергетика. — 2021. — №3. — С. 97–108.
6. Москаленко Р.В. Перспективные пути совершенствования диагностики силовых трансформаторов // Ползуновский вестник. — 2011. — №2. — С. 94–97.
7. Kozlov V.K., Valiullina D.M., Kurakina O.E. Visual determination of transformer oil quality parameters // Problemele energeticii regionale. — 2021. — №2. — С. 25–29.