

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Лютиковой Марины Николаевны «Факторы старения изоляционной системы высоковольтных трансформаторов и повышение ее долговечности», представленную на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника

Развитие современной цивилизации тесно связано с ростом энергопотребления как в валовом эквиваленте, так и на душу населения. Опережающими темпами растет потребление электроэнергии, имеющей неоспоримые преимущества перед другими видами энергии по удобству и эффективности транспортировки и использования конечным потребителем. Увеличение энергопотребления неизбежно влечет за собой рост требований к эффективности и надежности работы систем генерации, транспорта и распределения электричества. В этой связи, несомненно, актуальным является диссертационное исследование М. Н. Лютиковой, посвященное развитию представлений о процессах старения трансформаторных масел в процессе эксплуатации и разработке новых эффективных способов повышения износостойкости изоляционной системы трансформаторов с учетом сложившихся особенностей работы электротехнического оборудования в ЕЭС России.

Диссертация М. Н. Лютиковой построена по классической схеме и включает в себя введение, обзор литературы (глава 1), изложение и обсуждение результатов собственных исследований (главы 2–7), заключение, список сокращений и условных обозначений, список литературы (408 наименований) и приложения. Общий объем рукописи (включая приложения) – 355 страниц.

Обзор литературы (глава 1) занимает значительный объем диссертации (107 страниц) и по своему содержанию полностью соответствует теме диссертационного исследования: он посвящен рассмотрению основных свойств типовых диэлектрических жидкостей (минеральных и растительных масел, силиконовых жидкостей, синтетических сложных эфиров, а также смесевых композиций на их основе), методов оценки состояния жидкой изоляции в

процессе эксплуатации, способов улучшения её характеристик, включая сроки эксплуатации.

Представленный обзор носит выраженный аналитический характер, он содержит ссылки на 321 литературный источник, включая работы отечественных и зарубежных авторов, большинство из которых опубликованы за последние 10 лет, и свидетельствует о несомненной эрудиции автора по теме исследования. Текст главы 1 (как, впрочем, и последующих глав), логически структурирован, изложен ясно и грамотно, щедро иллюстрирован рисунками и таблицами. По итогам обзора автор делает логичный вывод о необходимости проведения исследований, результаты которых представлены в последующих главах диссертационной работы.

Детальное ознакомление с материалами, приведенными в главах с обсуждением результатов, позволяет сделать вывод, что сформулированная цель работы достигнута. Задачи, поставленные в рамках диссертации, успешно решены, при этом получены новые научные результаты, имеющие высокую теоретическую и практическую значимость. Среди этих результатов выделим следующие.

На основе корреляционно-регрессионного анализа большого массива многолетних данных по различным физико-химическим показателям, характеризующим качество минеральных трансформаторных масел различных марок, установлено, что лишь часть из них закономерным образом изменяется в течение эксплуатации. Предложены математические модели, описывающие данные закономерности для трансформаторов различных типов, которые могут быть использованы в практических целях для оценки остаточного ресурса безаварийной работы высоковольтного электрооборудования.

Установлено, что в процессе окислительной деструкции ионола (2,6-ди-трет-бутил-4-метилфенола), используемого в качестве антиоксидантной присадки, в трансформаторных маслах происходит последовательное накопление 2,6-ди-трет-бутил-*пара*-бензохинона и 2,6-ди-трет-бутилфенола; при этом последний образует с ионолом синергическую композицию, ингибирующую автоокисление трансформаторного парафинового масла существенно эффективнее, чем индивидуальный ионол.

Изучены динамики накопления пероксидов и расходования антиоксиданта в трансформаторном масле при разных температурах; выявлено влияние перекисных соединений и влажности на изоляционные свойства масляной и бумажной изоляции.

Разработан комплекс методик по контролю качества и диагностированию состояния высоковольтного маслонаполненного оборудования, который нашел практическое применение на предприятиях энергетического комплекса России, о чём свидетельствуют акты внедрения, подписанные руководителями филиалов ПАО «Россети» – Ямало-Ненецкое ПМЭС и Северное ПМЭС, НТЦ ООО «Изолятор-ВВ», ООО «ИТЦ УралЭнергоИнжиниринг» и АО «Россети Тюмень» (представлены в приложениях к основному тексту диссертации).

Исследовано влияние добавок синтетической сложноэфирной жидкости Midel 7131 на эксплуатационные свойства минерального трансформаторного масла ТКп, включая устойчивость к окислительному старению, газообразованию под действием электрического разряда, а также изменению изоляционных свойств при нагревании/охлаждении в широком температурном диапазоне и биоразлагаемость. Предложены составы эфирномасляных смесей для эксплуатации в электрооборудовании с доступом воздуха и без такового, обладающие лучшими характеристиками по сравнению с индивидуальными компонентами. Данная разработка решает, в частности, проблему дальнейшей эксплуатации электрооборудования, заполненного ТКп и нуждающегося в его доливке в условиях прекращения промышленного производства масла данной марки.

Следует отметить, что проведенное М. Н. Лютиковой диссертационное исследование выполнено на высоком теоретическом и экспериментальном уровне. Автором использован обширный набор современных измерительных приборов и методов анализа (газовая хроматография с пламенно-ионизационным детектированием и детектированием по теплопроводности, хромато-масс-спектрометрия, титриметрический анализ, высоковольтные испытания и измерения и др.). Математическая обработка результатов проведена с использованием классических методов математической статистики. Таким

образом, достоверность полученных экспериментальных данных не вызывает сомнений.

Все представленные в диссертации исследования проведены лично автором или при его непосредственном участии. Формулировка цели и задач исследования осуществлялась совместно с научным консультантом. Автор лично выбирал методы исследования, проводил эксперименты, анализировал полученные данные, выполнял математические расчеты; принимал личное участие на всех этапах подготовки, выполнения и оформления работ, опубликованных в соавторстве.

Диссертация в целом отвечает критериям научного единства. Содержание автореферата соответствует основным положениям диссертации. Выводы четко сформулированы, отвечают задачам исследования и верно отражают полученные результаты. Число, характер и качество публикаций по теме исследования соответствуют требованиям действующего положения о порядке присуждения ученых степеней.

Принципиальных недостатков рецензируемая диссертация не имеет. Однако следует отметить следующие дискуссионные моменты и замечания:

1. В работе установлено, что в силовых трансформаторах (СТ) с пленочной защитой изоляционные минеральные масла стареют довольно медленно, что соответствующим образом отражается в изменении значений тангенса угла диэлектрических потерь при 90 °С (ТАН) и кислотного числа (КЧ), а также концентрации антиокислительной присадки ионол (И), при этом указанные параметры изменяются со временем эксплуатации СТ по линейной зависимости. В то же время старение изоляционных масел в трансформаторах тока (ТТ) «со свободным дыханием» происходит значительно быстрее, и в этом случае значения ТАН, КЧ, И изменяются во времени по экспоненциальной зависимости. Согласно представленным в диссертации данным (рис. 2.3, 2.5, 2.7), начальные участки кинетических кривых, характеризующие изменения значений ТАН, КЧ, И в ТТ до величин, характеризующих таковые для СТ, так же могут быть экстраполированы в линейную зависимость.

В этой связи возникает вопрос: следует ли ожидать, что изменения величин ТАН, КЧ и И в СТ будут носить линейный характер независимо от длительности

эксплуатации и степени старения масла, или в удаленной перспективе следует ожидать ускорения такого старения? И, соответственно, могут ли найденные линейные корреляции использоваться для прогноза состояния масла в СТ на любой, неопределенно большой временной период или такой период ограничен?

2. В таблицах 2.15 – 2.17 и 2.19 – 2.21 представлено сравнение фактических и расчетных значений параметров ТАН, КЧ и И для трансформаторов с разным сроком эксплуатации, однако не указано на каком объеме выборки эти сравнения проводились, а также пересекаются ли выборки, на которых устанавливались корреляционные зависимости и оценивалась их прогностическая надежность.

3. На с. 164 автор отмечает, что «...оптимальным аналитическим способом получения прогнозируемого значения показателя в конкретный период эксплуатации, расчета степени износа и остаточного ресурса изоляции является кинетическое уравнение, отражающее изменение концентрации ингибитора окисления». Как это согласуется с данными, представленным на рис. 2.17 и 2.18, согласно которым для ряда находящихся в эксплуатации ТТ остаточный ресурс службы изоляции по ионулу исчерпал себя ещё 10-20 лет назад?

4. При обсуждении эффективности работы антиокислительной присадки ионол автор отмечает (с. 190), что «Механизм действия присадки заключается в улавливании пероксидных радикалов $ROO\cdot$ и переводе их в различные неактивные соединения, тем самым, не допуская распада пероксида на новые радикалы, ведущие к разветвлению цепного процесса». Не ясно, на каких основаниях сделано это заключение, поскольку в многочисленных работах разных лет, в том числе цитируемых в диссертационной работе (в монографии В. А. Рогинского, в частности, источник 327 в списке литературы), показано, что ионол не способен предотвращать распада пероксидов на свободные радикалы.

5. Далее на с. 191: «На рисунке 4.1 видно, что окисление ингибированного масла при низких температурах (от минус 20 °С до 0 °С) сопровождается ростом значения ПЧ. Последнее указывает на низкую эффективность работы антиокислительной присадки при отрицательных температурах». Такая интерпретация результатов исследования представляется весьма спорной,

поскольку представленные в литературе данные о величинах констант скоростей и параметрах уравнения Аррениуса для реакций ионола, с одной стороны, и кинетические параметры органических пероксидов, с другой, свидетельствуют о том, что при изменении температуры реакционная способность ионола меняется не столь критично, как устойчивость пероксидных соединений. Известно, что при температурах ниже 60 °С пероксиды, как правило, весьма стабильны, с чем и связано наблюдаемое автором увеличение перекисных чисел (ПЧ) при -20 °С и 0 °С. В этих условиях скорость образования пероксидов выше скорости их разложения на радикалы, что приводит к накоплению пероксидов; ионол же расходуется медленно, ввиду низкой интенсивности радикалообразования. При температуре выше 80 °С пероксиды обычно активно разлагаются (что закономерно отражают данные рис. 4.1), в результате образуется много радикалов, в реакциях с которыми ионол и расходуется ускоренным образом.

6. Автором установлено, что скорость биodeградации смеси сложного эфира Midel 7131 и трансформаторного масла ТКп прямо пропорциональна содержанию в ней Midel 7131. При этом на с. 213 автор отмечает, что добавление Midel 7131 к ТКп *«способствует биологическому разложению ароматического масла»*. Очевидно, здесь требуется уточнение: под ароматическим маслом подразумевается обсуждаемая смесь в целом или ТКп в ее составе.

7. Текст диссертации, как и автореферата, хорошо оформлен, и, без сомнения, тщательно вычитан. Вместе с тем, он содержит незначительное количество опечаток, к которым, в частности, следует отнести отсутствие названия главы 2 в оглавлении диссертации, пропуск буквы в слове «антиокислительной» в названии п. 4.1.1. (с. 3 и с. 188), отнесение терминов «перекись» и «пероксид» к соответствующим радикалам (с. 93), неточное библиографическое описание источника 334 в списке литературы. .

Представленные замечания не снижают ценности полученных результатов, но подтверждают высокий интерес к результатам работы.

В целом, рецензируемая диссертация М. Н. Лютиковой «Факторы старения изоляционной системы высоковольтных трансформаторов и повышение ее долговечности» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена научная проблема, имеющая важное хозяйственное

значение – повышение эффективности, долговечности и надёжности работы высоковольтного маслонаполненного электрического оборудования, функционирующего в Единой энергетической системе России. Прикладной характер работы и практическая ценность полученных в процессе ее выполнения результатов подтверждены сформулированными в заключении практическими рекомендациями, многочисленными актами внедрения результатов исследования в энергетических компаниях, патентами на изобретения и свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Полученные в диссертации научно-технические результаты расширяют фундаментальные представления о старении диэлектрических жидкостей, вносят значимый вклад в развитие методов диагностики состояния изоляции высоковольтного оборудования в процессе его эксплуатации, закладывают научные основы для новых технологических решений по использованию композиций антиоксидантных добавок и эфиромасляных смесей в высоковольтном оборудовании.

Диссертационное исследование М. Н. Лютиковой соответствует приоритетным направлениям фундаментальных и поисковых научных исследований, включенных в «Программу фундаментальных научных исследований в Российской Федерации на долгосрочный период (2021 – 2030 годы)», утвержденную распоряжением Правительства РФ № 3684-р от 31.12.2020 г.: Направление 1.4.4.4. Материаловедение энергогенерирующих, энергоаккумулирующих устройств, аппаратов, систем передачи и преобразования энергии.

Результаты представленной диссертации соответствуют паспорту научной специальности 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника, области исследований: п. 5. Изучение на стадиях от разработки до утилизации физико-химических процессов, определяющих свойства электротехнических и радиотехнических материалов и изделий в связи с их химическим составом, структурой и внешними условиями эксплуатации; п. 6. Оптимизация параметров электротехнических, радиотехнических материалов и изделий, технологии их производства, эксплуатации и утилизации; п. 8. Повышение долговечности и

надежности электротехнических и радиотехнических материалов и изделий на их основе.

Все вышесказанное позволяет считать, что диссертационная работа М. Н. Лютиковой «Факторы старения изоляционной системы высоковольтных трансформаторов и повышение ее долговечности», представленная на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника, в полной мере соответствует критериям, которым должны отвечать диссертации на соискание ученой степени доктора наук, установленным «Положением о присуждении ученых степеней», утвержденным постановлением Правительства РФ от 24.09.2013 г. № 842 (в ред. от 25.01.2024 г.), а её автор – Лютикова Марина Николаевна заслуживает присуждения искомой ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.1 – Теоретическая и прикладная электротехника.

Официальный оппонент:

Кандалинцева Наталья Валерьевна,

доктор химических наук, доцент, директор

экономических наук, заведующий кафедрой химии ФГБОУ ВО «НГПУ»

тел. +79139566000, e-mail: aquaphenol@mail.ru

Полные данные организации:

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Новосибирский государственный педагогический университет» (ФГБОУ ВО «НГПУ»)

630126, г. Новосибирск, ул. Виллойская, 28

тел. +7(383)2441161; e-mail: nspu@nspu.ru; <https://nspu.ru>

Отзыв получен 13.05.2024 г. / Рыбаков М.И.

Сотрудник ознакомился 17 мая 2024 г. / Лютикова М.Н.