

УТВЕРЖДАЮ:
Директор ОИВТ РАН,
академик РАН О.Ф. Петров

ОТЗЫВ

ведущей организации, Федерального государственного бюджетного учреждения науки Объединенный институт высоких температур Российской академии наук (ОИВТ РАН), 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»

Диссертационная работа Лютиковой Марины Николаевны посвящена разработке способов эффективного использования трансформаторного масла и продления его срока службы в высоковольтном оборудовании, посредством ингибирования, смешивания их с синтетическим эфиром, а также диагностирования состояния жидкой изоляции высоковольтного оборудования с помощью наиболее эффективным методик контроля.

Актуальность темы диссертации связана с постоянным ростом электропотребления и с увеличением нагрузки на изоляционную систему высоковольтных трансформаторов, что приводит к интенсификации старения изоляционных материалов и сокращению сроков их службы. Следовательно, возникает потребность в совершенствовании эксплуатационных свойств изоляционных материалов, в том числе трансформаторного масла. В магистральных электрических сетях России большое количество трансформаторов эксплуатируется с минеральными маслами ГК ($\approx 49\%$) и ТКп ($\approx 22\%$). В процессе старения масла ГК характерно образование воскообразных отложений, которые могут служить очагами локальных перегревов и развития пробоя, что способствует выходу маслonaполненного высоковольтного оборудования из строя. Масло ТКп в процессе эксплуатации высоковольтного оборудования подвержено осадкообразованию. Образующиеся осадки закупоривают охлаждающие каналы и ухудшают отвод тепла от обмоток трансформатора. Еще одной проблемой масла ТКп является возникновение дефицита для доливки в оборудование из-за прекращения его производства. Поэтому диссертационная работа Лютиковой М.Н., направленная на исследование эксплуатационного состояния трансформаторного масла ГК и ТКп из действующих высоковольтных трансформаторов с применением новых методик контроля, а также разработку способов улучшения эксплуатационных свойств трансформаторных масел ГК и ТКп является актуальной.

Научная новизна диссертационной работы связана с экспериментальными исследованиями характеристик эксплуатационных трансформаторных масел ГК и ТКп из действующих высоковольтных трансформаторов напряжением 110-500 кВ с помощью новых методик контроля, позволяющие с наибольшей эффективностью оценить состояние жидкой изоляции в электрооборудовании. В результате проведенных исследований:

1. Установлена регрессионная зависимость процесса старения «срок службы - ионол», позволяющая получать информацию о степени износа жидкой изоляции, а также

прогнозировать остаточный срок службы изоляции с зависимостью от вида высоковольтного оборудования, класса напряжения и марки масла.

2. Обнаружено, что в процессе старения трансформаторного масла ТКп в баках высоковольтных трансформаторов образуются продукты разложения ионола, повышающие долговечность использования масла в оборудовании.

3. Выяснено, что антиокислительная присадка ионол эффективно защищает трансформаторное масло от дальнейшего окисления при положительных температурах - выше 20°C. При низких температурах ионол не стабилизирует масло, содержащее большое количество перекисей и гидроперекисей, от дальнейшего окисления.

4. Предложены эффективные технические решения по усилению эксплуатационных свойств трансформаторного масла, и, как следствие, улучшению электроизоляционных свойств и увеличению срока службы изоляционных материалов в высоковольтном оборудовании:

- показано положительное влияние ионола и второй присадки при совместном присутствии на повышение долговечности и эффективности использования изоляционного парафинового масла с высоким содержанием перекисных соединений.

- впервые проведено комплексное измерение электрофизических параметров трансформаторного масла и эфиромасляных смесей в процессе продолжительного старения в разных условиях (герметичная и негерметичная система) с целью определения степени изменения электроизоляционных свойств жидкостей.

- проведено исследование структурно-группового состава эфиромасляных смесей до и после их продолжительного старения в разных условиях с применением ИК-спектроскопии. Для оценки степени разложения смесей масла и эфира впервые введено понятие индекса деструкции (ИДСМ). Согласно полученным значениям индекса деструкции улучшение противоокислительных свойств масла ТКп происходит в смеси с долей синтетического эфира 20% и 30%. В этом случае срок службы жидкой изоляции по сравнению с самим маслом увеличится на 43% и 68%, а в герметичных условиях на 46% и 69%.

- установлено, что с увеличением доли синтетического эфира в смеси с трансформаторным маслом под влиянием разрядных процессов образование газов снижается на 22-55 %, а при термической деструкции газов синтезируется меньше на 10-41 % по сравнению с газообразованием в трансформаторном масле.

5. Впервые проведено исследование влияния смесей масла и синтетического эфира на интенсивность деструкции бумажной изоляции в температурном диапазоне 90-130 °С. Показано, что старение бумажной изоляции, пропитанной смесями масла с долей синтетического сложного эфира 20% и 30%, существенно замедляется. При этом срок службы целлюлозы увеличивается в 1,2-2,3 раза при температуре 60-80 °С, что в целом приведёт к повышению долговечности и надёжности работы изоляционной системы.

6. Впервые изучено влияние температуры на электрическую прочность увлажнённых изоляционных смесей масла и синтетического эфира в процессе охлаждения в диапазоне от плюс 60°C до минус 20°C, а также в процессе нагревания от минус 20°C до плюс 60°C. Установлено, что критически низкое значение электрической прочности имеет место при переходе температуры через ноль во время нагревания диэлектрических жидкостей, что характерно при включении трансформатора под нагрузку в холодное время года после длительного простоя в условиях отрицательных температур.

Научная и практическая значимость состоит в решении крупной проблемы снижению работоспособности высоковольтного маслonaполненного электрооборудования путем увеличения износостойкости применяемых изоляционных материалов, продления ресурса изоляции, а также наиболее эффективного контроля состояния изоляции в процессе эксплуатации высоковольтных трансформаторов на основе индикации продуктов деструкции изоляционных материалов инструментальными методами. Предложены способы утилизации отработанного трансформаторного масла. К наиболее важным для практического применения результатам можно отнести следующие:

- выяснено, что скорость изменения значений физико-химических показателей (тангенс угла диэлектрических потерь при 90 °С, кислотное число, содержание присадки ионов), характеризующие старение жидкого диэлектрика, в условиях эксплуатации в высоковольтных силовых трансформаторах (СТ) с пленочной защитой в несколько раз ниже, чем в высоковольтных измерительных трансформаторах (ТТ) со «свободным дыханием», несмотря на более высокую среднегодовую температуру масла в СТ (40-50 °С) по сравнению с температурой масла из ТТ (минус 3 °С);

- на основе регрессионного анализа многолетних данных получена зависимость процесса старения «срок службы - ионол», а также константы скоростей расходования ионла в высоковольтных трансформаторах напряжением 110-500 кВ, заполненных маслом ТКп и ГК. При использовании аналитического способа, данная зависимость позволяет получить ценную информацию о степени износа жидкой изоляции в высоковольтных трансформаторах, а также спрогнозировать остаточный срок службы изоляции с высокой точностью;

- разработана новая методика определения ионла и продуктов его разложения (2,6-ди-трет-бутилфенол; 2,6-ди-трет-бутил-р-бензохинон) в эксплуатационном масле из высоковольтного оборудования, которая заключается в извлечении продуктов окисления масла экстрагентом с последующим анализом пробы на хромато-масс спектрометре;

- предложена новая методика определения ионла и родственных ему соединений, базирующаяся на газовой хроматографии с пламенно-ионизационным детектором, которая находит широкое применение в практике электросетевых лабораторий;

- показано, что воскообразные отложения, образующиеся в результате продолжительного старения трансформаторного масла ТКп и ГК, ухудшают электроизоляционные свойства твердой изоляции высоковольтного оборудования (на 31-62%);

- предложен способ повышения долговечности и эффективности использования изоляционного парафинового масла, содержащее большое количество перекисей, путем одновременного ингибирования его двумя присадками. Обнаружено, что в этом случае проявляется эффект синергизма и износостойкость масла увеличивается почти в 4 раза по сравнению с маслом, ингибированного только ионолом;

- предложено решение по повышению стабильности склонного к осадкообразованию трансформаторного масла ТКп, путем смешивания его с синтетическим эфиром в определенном соотношении. А именно, при эксплуатации диэлектрической смеси в открытых условиях достаточной является пропорция смешивания ММ:СЭ равной 80% : 20% по объему. В герметичных условиях для предотвращения образования осадка масло должно содержать не менее 30% эфира по объему;

- для оценки степени разложения эфиромасляных смесей при их эксплуатации в высоковольтном оборудовании впервые введено понятие индекса деструкции (ИДСМ), расчет которого основан на изменении оптических плотностей на полосе группы С=О и группы С(=О)-О-С;

- предложена газохроматографическая методика, позволяющая проводить расширенный анализ газов (Н₂, СН₄, С₂Н₂, С₂Н₄, С₂Н₆, СО, СО₂, О₂, N₂ и углеводородов состава С₃ и С₄, растворенных в диэлектрических жидкостях, при этом особых технических и финансовых затрат не требуется;

- определены коэффициенты растворимости (Оствальда) газов (14 компонентов: водород - Н₂, метан - СН₄, ацетилен - С₂Н₂, этилен - С₂Н₄, этан - С₂Н₆, оксид углерода - СО, диоксид углерода - СО₂, кислород - О₂, азот - N₂, пропан - С₃Н₈, пропилен - С₃Н₆, пропин - С₃Н₄, н-бутан - С₄Н₁₀, бутен-1 - С₄Н₈, растворенных в смесях трансформаторного масла ТКп и сложноэфирной диэлектрической жидкости Midel 7131;

- предложено уравнение для определения прогнозируемого срока и остаточного ресурса бумажной изоляции при старении её в эфиромасляных смесях;

- аналитическим способом на основе эмпирического уравнения Антуана получены значения предельного влагосодержания масла ТКп и его смесей с разным содержанием сложноэфирной синтетической жидкости Midel 7131 (10%, 20% и 30%) в диапазоне температур от +60°C до -20°C;

- показано, что в процессе нагревания увлажненного масла, а также масла с содержанием эфира меньше 10% при переходе через ноль между электродами формируется сначала ледяной, а затем водяной мостик, снижающий электрическую прочность изоляции до критических значений. Напротив, образование мостиков из частиц льда или капелек воды не наблюдается при добавлении синтетического эфира к трансформаторному маслу в количестве более 20% по объему.

Рекомендации по использованию результатов и выводов работы

Полученные научно-технические результаты расширяют базу знаний об электроизоляционных свойствах эфиромасляных смесей, механизмах старения диэлектрических жидкостей (минеральное нефтяное масло, сложноэфирная диэлектрическая жидкость, эфиромасляные смеси), уточняют теоретические и прикладные представления о методах контроля их состояния в процессе эксплуатации, создают основу для совершенствования инженерных решений в целях практического применения перспективных биожидкостей и эфиромасляных смесей в высоковольтном оборудовании.

Потенциальными организациями для использования в качестве изоляции и теплоотводящей среды, как сложноэфирных жидкостей, так и эфиромасляных смесей, являются производители электротехнического оборудования с бумажно-масляной изоляцией, а также предприятия генерации, магистральных и распределительных сетей. Основными организациями, изготавливающими маслonaполненное высоковольтное оборудование на территории России, являются: АО «Электрозавод» (силовые трансформаторы, автотрансформаторы и реакторы всех типов напряжением 6-750 кВ); АО «Группа СВЭЛ» (силовые трансформаторы и автотрансформаторы 35-500 кВ); ООО «СМТТ Высоковольтные решения» (силовые трансформаторы и автотрансформаторы 110-500 кВ); УЭТМ (силовые трансформаторы и автотрансформаторы 6-220 кВ, реакторы 10-35 кВ); ООО «Сименс Трансформаторы» (силовые трансформаторы и автотрансформаторы 6-330 кВ); ООО «Гольяттинский трансформатор» (силовые трансформаторы, автотрансформаторы и реакторы всех типов напряжением 6-500 кВ); АО «РЭТЗ Энергия» (измерительные трансформаторы тока 35-220 кВ; измерительные трансформаторы напряжения 10-750 кВ; дугогасящие реакторы 6-10 кВ); ОАО «Алтайский трансформаторный завод» (силовые трансформаторы 6-10 кВ); ОАО «СЗТТ» (силовые трансформаторы 6-10 кВ; измерительные трансформаторы тока 110 кВ) и др.

Диссертационная работа Лютиковой Марины Николаевны **по содержанию и структуре** соответствует требованиям ВАК к научно-квалификационной работе на соискание ученой степени доктора наук. Диссертация состоит из введения, семи глав, заключения и четырех приложений, полный объем составляет 355 страниц, включая 136 рисунков и 75 таблиц, список литературы содержит 408 наименований.

Во **введении** обоснованы актуальность темы и проведенных исследований, определены цель и задачи работы, сформулированы ее научная новизна, теоретическая и практическая значимость, выносимые на защиту научные положения, достоверность и обоснованность результатов, приведены сведения об апробации и публикациях.

Первая глава посвящена истории развития жидких диэлектриков в системе энергетики, рассмотрены расширенные требования к свойствам изоляционных жидкостей. На основе зарубежных и отечественных публикаций проведен сравнительный анализ изоляционных свойств минерального масла, альтернативных жидких диэлектриков (биоразлагаемые синтетические и натуральные сложные эфиры). Приведены преимущества и недостатки применяемых изоляционных жидкостей, а также способы улучшения их электрофизических и химических свойств, в том числе за счет смешения минеральных масел с альтернативными жидкими диэлектриками. Рассмотрены механизмы старения

диэлектрических жидкостей под влиянием различных факторов, существующие на сегодняшний день методы и критерии оценки состояния жидких диэлектриков. Приведен анализ проблем, которые следует решить для успешного применения диэлектрических жидкостей (минеральные масла, сложноэфирные биожидкости, а также эфиромасляные смеси) в высоковольтном оборудовании.

Во второй главе представлены результаты исследования взаимосвязи физико-химических показателей качества масла (U_{np} , W , $T_{всн}$, $KПЧ$, $ТАН$, $КЧ$, $И$) и сроком эксплуатации высоковольтных трансформаторов с пленочной защитой и со свободным дыханием. На основе графически построенных корреляционных зависимостей « $ТАН$ - возраст ЭО», « $КЧ$ - возраст ЭО», « $И$ - возраст ЭО» получены уравнения регрессии. Установлено, изоляционное масло в высоковольтных трансформаторах с пленочной защитой стареет с постоянной скоростью. Значение $ТАН$, $КЧ$, $И$ в масле из высоковольтных трансформаторов со свободным дыханием изменяется со временем эксплуатации по экспоненциальной зависимости, то есть изоляционное масло стареет с неодинаковой скоростью в разные периоды эксплуатации трансформатора, а именно в первые 20 лет старение изоляции идет медленно, после 20 лет – деструктивные процессы заметно ускоряются. Получены уравнения для расчета прогнозируемого значения физико-химического показателя и остаточного ресурса изоляционного масла в определенный период его эксплуатации в высоковольтном трансформаторе. Установлено, что наиболее 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.

В третьей главе проведено расширенное исследование продуктов старения минерального масла из баков высоковольтных трансформаторов с помощью нестандартных физико-химических и инструментальных методов. С применением новой разработанной методики в эксплуатационных маслах обнаружены вещества по строению и свойствам аналогичные антиокислительной присадки ионол. Выявлено их положительное влияние на сдерживание лавинообразного окисления трансформаторного масла в процессе его эксплуатации в электрооборудовании.

По адаптированной методике проведено определение перекисного числа в рабочих пробах масла ТКп и ГК из баков измерительных трансформаторов тока. Анализ полученных результатов выявил, что значение $ПЧ$ в пробах масла с низким содержанием ионола (менее 0,1% масс.) в 2-4 раза выше, чем в масле с концентрацией присадки более 0,1% масс. При этом наибольшее количество перекисных соединений обнаружено в масле ГК (в 3-4 раза больше, чем в масле ТКп). Экспериментально показано негативное влияние перекисных соединений на электрическую прочность трансформаторного масла, а именно, масло с относительно высоким $ПЧ$ и влагосодержанием имеет пробивное напряжение в 1,5 раза ниже, чем масло с высоким содержанием воды. Кроме того, в увлажненном масле с высоким $ПЧ$ при подаче высокого переменного напряжения между электродами была зафиксирована очень интенсивная и затяжная дуга.

Несмотря на наличие «естественных» ингибиторов окисления в процессе продолжительного старения в масле образуются воскообразные отложения. Проведено исследование таких отложений, взятых из разных частей демонтированных высоковольтных маслонаполненных вводов напряжением 110-220 кВ. По адаптированным методикам в отложениях определены значения перекисного числа. Наибольшее содержание перекисных соединений обнаружено в воскообразных отложениях из высоковольтных вводов 110-220 кВ, которые продолжительное время эксплуатировались с парафиновым маслом ГК. Специальный эксперимент показал, что электрическая прочность электрокартона, пропитанного воскообразными отложениями (ТКп, Т-750, ГК), снижается на 31-62 % по сравнению с сухим чистым электрокартоном.

В четвертой главе предложены способы по улучшению химической стабильности парафинового и ароматического трансформаторного масла, как залог продления работоспособного состояния изоляционной системы любого высоковольтного оборудования. По результатам испытаний показано, что одним из способов улучшения химической стабильности парафинового масла ГК с высоким содержанием перекисей является совместное применение двух присадок, а именно ионола и второго ингибитора. При их совместном применении наблюдается взаимно усиливающий эффект (синергизм). Продолжительность индукции окисления парафинового масла ГК в присутствии двух присадок увеличивается почти в 4 раза по сравнению маслом, ингибированным только ионолом (С=0,2% масс). Оптимальным способом усиления химической стабильности трансформаторного масла ТКп, характеризующегося повышенным осадкообразованием, является его смешение масла с синтетической сложноэфирной жидкостью Midel 7131. В работе предложены условия смешения, позволяющие получить однородную смесь масла и эфира, которые заключаются в тщательном перемешивании двух жидкостей при температуре не ниже 30°C. Показано, что добавление синтетической сложноэфирной жидкости Midel 7131 к трансформаторному маслу ТКп в количестве 10-30 % способствует улучшению физико-химических показателей трансформаторного масла (растворимость воды; пробивное напряжение; диэлектрическая проницаемость; температура вспышки; оптическая мутность; класс промышленной чистоты; стабильность против окисления; индукционный период; коррозионная активность).

В пятой главе представлены результаты исследований по изменению эксплуатационных свойств смесей после их продолжительного старения (2000 ч) в негерметичных и герметичных условиях при температуре 100°C, а также после воздействия разрядных процессов. Показано, что смешение синтетического эфира с ароматическим маслом в количестве 5% и 10% (по объему) приводит к образованию смесей, проявляющих признаки коллоидной системы. Об этом свидетельствуют нетипичные тренды на диаграммах, отражающих изменение тангенса угла диэлектрических потерь после продолжительного старения (в герметичных условиях и со свободным доступом воздуха к поверхности смеси). Увеличение доли эфира в смеси более 20% и выше положительно отражается на физико-химических показателях качества ароматического масла, поскольку приводит к стабилизации или замедлению химических реакций, протекающих вследствие термоокислительного воздействия. При термическом воздействии (без доступа воздуха) добавление синтетического эфира к ароматическому маслу в объеме 30% и выше также позволяет переломить ситуацию с образованием осадка, обусловленного деструкцией и поликонденсацией ароматических углеводородов в минеральном масле.

Установлено, что с увеличением доли синтетического эфира в смеси с трансформаторным маслом под влиянием разрядных процессов образование газов снижается на 20% и более по сравнению с газообразованием в трансформаторном масле.

В шестой главе проведены исследования по изучению влияния эфиромасляных смесей на деструкцию бумажной изоляции. Показано, что старение бумажной изоляции в смесях масла с содержанием эфира 10-30 % в несколько раз медленнее, чем пропитанная трансформаторным маслом. Наиболее благоприятные условия для продолжительной эксплуатации бумаги являются эфиромасляные смеси с долей эфира 30%. В этом случае износостойкость бумажной изоляции увеличивается почти в 2 раза по сравнению со сроком службы бумаги в трансформаторном масле. Таким образом, повышается долговечность и надежность использования изоляционных материалов «бумага-жидкость» в электрооборудовании.

В седьмой главе изучено изменение электрической прочности эфиромасляных смесей с разным влагосодержанием в процессе их охлаждения (от плюс 60°C до минус 20°C) и нагревания (от минус 20°C до плюс 60°C). Выявлено, что в процессе охлаждения масла и эфиромасляных смесей критическим диапазоном температур, где электрическая прочность масла и эфиромасляных смесей снижается до очень низких значений, является промежуток

от плюс 10°C до минус 10°C. Электрическая прочность в случае нагревания жидкостей имеет критическое значение в области температур от минус 10°C до плюс 20°C (для масла) и от минус 10°C до плюс 10°C (для смесей масла с эфиром 10-30 %). На основе эмпирического уравнения Антуана, приведены расчетные значения предельного влагосодержания масла ТКп и его смесей с разным содержанием сложноэфирной синтетической жидкости Midel 7131 (10%, 20% и 30%) в диапазоне температур от плюс 60°C до минус 20°C. Установлено, что в увлажненных смесях масла с содержанием эфира 10%, 20% и 30% по мере их нагревания растворение избыточной воды происходит чуть быстрее, чем в пробах трансформаторного масла. Впервые показано, что в процессе нагревания увлажненного масла, а также масла с содержанием эфира ниже меньше 10% при переходе через ноль между электродами формируется сначала ледяной, а затем водяной мостик, снижая электрическую прочность изоляции до критических значений. Напротив, образование мостиков из частиц льда или капелек воды не наблюдается при добавлении синтетического эфира к трансформаторному маслу в количестве более 20% по объему.

В разделе **заключение** диссертации сформулированы основные результаты проделанной работы.

При общей положительной оценке работы по тексту диссертации имеются следующие **замечания**:

1. В таблицах 2.14 и 2.18 приведены значения констант скоростей старения изоляционного масла из баков действующих высоковольтных трансформаторов напряжением 110-500 кВ при среднегодовой температуре изоляции 50°C (в случае трансформаторов с пленочной защитой) и минус 3°C (в случае трансформаторов со свободным дыханием). С практической точки зрения интересно было бы привести значения констант скоростей старения масла в трансформаторах для других температурных условий эксплуатации изоляционного масла в высоковольтных трансформаторах.

2. В главе 4 представлены результаты по изучению индукционного периода окисленного масла ГК, содержащего две антиокислительных присадки. При этом показано изменение таких характеристик, как оптическая мутность, кислотное число и тангенс угла диэлектрических потерь. Повлияет ли внесение присадок на электрическую прочность изоляционного масла и на сколько?

3. В главе 4 на рисунке 4.2 представлены результаты расчета средней скорости расхода ионала в процессе продолжительного окисления масла при температуре от минус 20°C до плюс 120°C. Однако на рисунке 4.1, где показана эффективность работы ионала при различных температурах, не приведены данные для 60°C и 120°C.

4. При изучении изоляционных свойств эфиромасляных смесей автором приводятся данные только для смесей масла с долей эфира по объему 5, 10, 20 и 30 %. Как будут изменяться эксплуатационные свойства изоляционной смеси масла с долей синтетического эфира более 30%?

5. В главе 7 изучено изменение электрической прочности в процессе охлаждения и нагревания свежеприготовленных эфиромасляных смесей масла с долей эфира 10, 20 и 30 % с содержанием воды 8 до 84 г/т. Можно ли предположить, как будет влиять на электрическую прочность и образование леденистых включений или микрокапель воды в случае охлаждения или нагревания окисленных эфиромасляных смесей?

6. По тексту диссертации встречаются опечатки, например, в оглавлении диссертации отсутствует название главы 2.

Сделанные замечания не влияют на основные результаты и выводы диссертации и не снижают высокого научного уровня исследований.

Основные результаты диссертационной работы **опубликованы** в двадцати статьях в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК (включая журналы категории К1 и К2 – 8 статей) и входящих в базы данных Scopus и Web of Science, в двух патентах РФ на изобретение и в одном свидетельстве о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Результаты работы представлялись и докладывались автором на пятнадцати Международных и Всероссийских конференциях. Во введении диссертационной работы автор разъясняет свой личный вклад в представленные в диссертации результаты. Постановка всех задач и цели исследований, анализ результатов и выводы были сделаны непосредственно автором работы.

В целом работа выполнена на высоком экспериментальном уровне, вносит существенный вклад в понимание о методах диагностирования состояния жидкой изоляции высоковольтного оборудования с применением наиболее эффективных методик, а также способов улучшения электроизоляционных свойств трансформаторных масел путем дополнительного их ингибирования и смешения с синтетическими эфирами. Выводы диссертационной работы научно обоснованы и не вызывают сомнений. Автореферат полностью отражает основное содержание диссертации.

Диссертационная работа Лютиковой М.Н., автореферат диссертации и отзыв ведущей организации были рассмотрены, обсуждены и одобрены на межотдельском заседании ОИВТ РАН (от 22 мая 2024 г, протокол № 7) с участием всех научных подразделений, в том числе профильных по теме диссертации, а именно, отдел № 2 - электрофизических и плазменных технологий, теоретический отдел №7 им. Л.М. Бибермана, отдел № 17- пылевой плазмы, лаборатория №3 – импульсной электрофизики, лаборатория №15.1 - электрофизики и плазменных процессов, лаборатория №18 – плазменных технологий.

Диссертационная работа «Факторы старения изоляционной системы высоковольтных трансформаторов и повышение ее долговечности» представляет собой законченную научно-квалификационную работу, которая соответствует всем критериям, установленным п. 9 Положения о присуждении ученых степеней № 842 от 24.09.2013 г. (ред. 25.01.2024 г.), а ее автор Лютикова Марина Николаевна заслуживает присуждения ученой степени доктора технических наук по специальности 2.4.1 – «Теоретическая и прикладная электротехника».

Отзыв составил главный научный сотрудник лаборатории № 2.3 - плазмы отдела № 2 - электрофизических и плазменных технологий ОИВТ РАН, д.ф.-м.н., профессор

22 мая 2024 г.

Василяк Леонид Михайлович

125412, г. Москва, Ижорская ул. 13, стр. 2, тел. (495) 484-18-10, vasilyak@ihed.ras.ru

Заместитель директора по научной работе ОИВТ РАН, д.ф.-м.н.

125412,
Федера
высоки
тел. (49

Васильев Михаил Михайлович

484-23-55, vasiliev@ihed.ras.ru.
ение науки Объединенный институт
, ул. Ижорская, д.13, стр.2,

Отзыв получен 25 мая 2024 г. *Василяк*

С отзывом ознакомлена 29 мая 2024 г. *Лютикова М.Н.*