

## **Отзыв**

официального оппонента, доктора технических наук,  
**Коржова Антона Вениаминовича**  
на диссертационную работу **Грешнякова Георгия Викторовича**  
**«Комплексная оценка технических и эксплуатационных характеристик  
XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения»**,  
представленную на соискание учёной степени доктора технических наук  
по специальности 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия

### **1. Актуальность темы и решаемой проблемы**

Актуальность рецензируемой диссертационной работы обусловлена рядом факторов: **1.** Решается проблема по повышению надёжности XLPE – кабельных систем (КС) среднего и высокого напряжения по всей технологической цепочке от проектирования, производства, неразрушающей диагностики и до безопасной эксплуатации. **2.** Необходимость проведения анализа влияния на работоспособность конструкций КС, заменяющих в настоящее время в условиях мегаполисов воздушные линии, их отдельных составляющих, с учётом реальных условий эксплуатации в электрических сетях. Выявление и модернизация слабых мест в элементах КС, в том числе в кабельных муфтах, при пробое в которых может быть потеряна вся КС, что особенно актуально для надёжности работы системообразующих сетей высокого напряжения. **3.** К настоящему времени не решена в полном объёме проблема выявления мест повреждений изоляции КС. Существует необходимость поиска новых простых и удобных в эксплуатации методов испытания изоляции и диагностики, что подчеркивается многочисленными отечественными и зарубежными публикациями. **4.** Необходимость разработки комплексных методов решения задач теплового и электромагнитного расчёта КС, описывающих связанные физические процессы, не существующие отдельно друг от друга. Методы необходимы для уточнения нагрузочной способности в рабочих и переходных режимах работы кабельных линий (КЛ), а также оценки потерь мощности. **5.** Учёт фактора безопасности работы КС с позиций негативного влияния на человека и электромагнитной совместимости в условиях перехода в электрических сетях на микропроцессорные устройства релейной защиты и автоматики.

Указанные факторы рассматриваются в диссертационной работе Грешнякова Г.В. Поставленная цель работы и задачи для её достижения актуальны как в практическом, так и теоретическом аспектах.

## **2. Степень достоверности, обоснованности и новизны выдвинутых научных положений, полученных результатов, выводов и рекомендаций для теории и практики**

Рассмотрим выдвинутые на защиту научные положения и полученные на их основе результаты.

Так, **научное положение (результат) №1** и соответствующий ему вывод №1 гласит: *«Разработана новая методика оценки нагрузочной способности силовых XLPE – КС на базе анализа комплексных численных моделей, учитывающих условия и способы прокладки, монтажа, наличие проводящих элементов как конструкции, так и находящиеся в зоне влияния полей. Учитываются тепловые и магнитные свойства материалов и сред, влияние скорости перемещения воздушных потоков на конвективный теплообмен, а также воздействие сторонних источников электромагнитного и температурного влияния. Проведена оптимизация параметров испытательного напряжения СНЧ на основе анализа результатов испытаний КЛ класса 10-35 кВ и 110 кВ».*

*Новизной* положения №1 является развитие существующих методик оценки пропускной способности КС путём совместного решения уравнений, описывающих распределение электромагнитного и теплового полей. *Оригинальностью* является разработка комбинированного метода моделирования связанного электромагнитного и температурного расчёта, позволившего автоматически передавать данные из задачи анализа магнитного поля переменных токов в задачу анализа температурного поля. *Достоверность* и *обоснованность* первого научного результата подтверждается сравнением с расчётами по методике МЭК 60287, а также многочисленными примерами реальных расчётов практических задач. В результате соискателем обоснован новый вывод о более высокой достоверности результатов расчёта с применением разработанного совместного полевого моделирования электромагнитного и температурного взаимодействия для сложных моделей (многоцепные линии, параллельно расположенных КЛ, кабельные блоки и т.п.), что актуально на практике и способно предоставить проектировщику более полные, чем стандарт МЭК 60287, данные для принятия проектных решений.

Кроме того автором расширена и обоснована возможность испытаний напряжением сверхнизкой частоты (СНЧ), определено оптимальное время и уровень испытательного напряжения.

**Научное положение №2** (вывод №2) гласит: «Разработаны новые (триаксиальные) конструкции силовых низкоиндуктивных импульсных кабелей (СНИК) среднего напряжения с двухслойной XLPE – изоляцией и разными сечениями проводников, для их использования, в качестве вспомогательных, в составе опытного образца термоядерного реактора (программа ITER). Разработаны конструкции концевых испытательных муфт. Проведены предварительные, типовые и предквалификационные (ресурсные) испытания СНИК в составе кабельной линии среднего напряжения».

Новизной и оригинальностью второго положения является разработанная автором технология теоретического расчёта и практической реализации всей цепочки от проектирования до производства и испытаний образцов уникальных силовых низко-индуктивных импульсных кабелей с двухслойной изоляцией для применения в импульсных системах, что особенно, в положительном плане, отличает данную диссертацию. Достоверность и обоснованность второго научного результата подтверждается практическим использованием результатов работы, позволившим решить задачу разработки, испытания и изготовления надёжного сильноточного токоведущего соединения сверхпроводящих магнитных катушек с энергопоглощающими резисторами в системах оперативного и аварийного вывода энергии ИТЭР. В приложении к диссертации приводятся соответствующие протоколы.

**Научное положение №3** (вывод №3) гласит: «Разработан перспективный емкостной метод снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт, на базе сочетания геометрического и рефракционного способов. Разработанный метод реализован при разработке, изготовлении, предварительных, типовых и предквалификационных испытаниях опытных образцов концевых и соединительных муфт в составе КЛ класса 110 кВ».

Новизной и оригинальностью третьего положения можно считать развитие теории расчёта и методов снижения неравномерности распределения электрического поля в усиливающей изоляции кабельных муфт путём разработки перспективного емкостного метода с комбинированным сочетанием геометрического и рефракционного способов управления полем. Использование численного моделирования электрического поля в муфтах позволило автору определить проблемные зоны (критические точки) с максимальной концентрацией поля, а далее –

не только теоретически обосновать, но и найти практически новые конструктивные решения, снижающие риск пробоя изоляции на данных участках. *Достоверность и обоснованность* третьего научного результата подтверждается выработанными автором практическими рекомендациями к конструктивным параметрам стресс конуса соединительной муфты. По результатам расчётов усиливающей изоляции концевых и соединительных муфт с емкостным способом управления полем были изготовлены стресс конуса, скомпонованы, смонтированы и испытаны последовательно макеты и опытные образцы кабельных муфт в составе кабельной линии 110 кВ.

**Научное положение №4** (вывод №4) гласит: *«Сформулированы основные принципы, выполнено численное моделирование и, на этой основе, проведено макетирование концевых и соединительных муфт класса 110 кВ, в которых применён комбинированный ёмкостно-резистивный метод выравнивания поля, где в качестве элемента, управляющего полем, применена термоусаживаемая трубка-регулятор».*

*Новизной* положения №4 является развитие теоретических принципов выравнивания поля в концевых и соединительных муфтах класса 110 кВ, при этом *оригинальностью* является обоснование применения комбинированного ёмкостно-резистивного метода выравнивания поля с применением оптимизированной по термическим и электрическим параметрам термоусаживаемой трубки-регулятора. *Достоверность и обоснованность* четвёртого научного результата подтверждается проведённым макетированием концевых и соединительных муфт класса 110 кВ, а также их испытанием.

**Научные положения №5-6** (вывод №5) гласят: *«Систематически исследованы чувствительные параметры XLPE-изоляции, характеризующие процессы старения, и обоснован вывод о выборе в качестве основного – тангенса угла диэлектрических потерь»; «Предложены варианты контроля  $\text{tg}\delta$  изоляции КЛ как функции от частоты питающего напряжения в процессе эксплуатации».*

*Новизной* пятого и шестого положений является развитие теории процессов старения и диагностики XLPE-изоляции с обоснованием структурно-чувствительных параметров старения XLPE-изоляции. *Оригинальностью* является предложенные методы контроля значений тангенса угла диэлектрических потерь для каждой гармоники в процессе эксплуатации. *Достоверность и обоснованность* данных научных

результатов подтверждается апробированными способами контроля предложенных диагностических параметров на практике.

**Научное положение №7** (вывод №6) гласит: *«Теоретически обоснованы, сконструированы, изготовлены и испытаны в составе КЛ макеты магнитных экранов специальной конструкции (концентраторов магнитного поля) для выполнения требований по ЭМС и электромагнитной экологии трёхфазных кабельных линий, проложенных группой однофазных кабелей. Для оптимизации угла раскрытия зазора и ориентации экрана на поверхности каждой фазы, применён генетический алгоритм (ГА)».*

*Новизной* седьмого положения является развитие теории экранирования магнитного поля (МП) от КЛ с целью обеспечения электромагнитной совместимости, *оригинальностью* является использование современного метода на основе ГА для обоснования новой конструкции экранов и сама их конструкция. *Достоверность* и *обоснованность* положения подтверждена натурными испытаниями сконструированных магнитных экранов.

### **3. Практическое значение результатов работы**

Соискателем разработаны, испытаны, апробированы и внедрены в практику (*приводятся соответствующие протоколы во втором томе диссертации*): 1) оптимизированная методика оценки пропускной способности трёхфазных КЛ и КС, проложенных группой однофазных кабелей при любых условиях и способах прокладки, а также при любых способах объединения и заземления металлических экранов; 2) полный ряд высоковольтных СНИК с XLPE-изоляцией для их применения в качестве вспомогательных в системе управления и коммутации макета термоядерного реактора, разработанного в рамках программы ITER; 3) оригинальные программы и методики предквалификационных и квалификационных испытаний СНИК и альтернативные варианты промышленного применения СНИК в энергетике; 4) концевые (наружной установки) и соединительные (с прямым соединением и с разделением экранов) кабельные муфты 110 кВ, в усиливающей изоляции которых использован вновь разработанный комплексный емкостной метод регулирования электрического поля путём сочетания геометрического и рефракционного способов; 5) основные принципы перехода от комбинированного емкостного к резистивному и резистивно-емкостному методу регулирования поля в усиливающей изоляции кабельных муфт высокого напряжения с регулирующим элементом

в виде трубки-регулятора; 6) обоснован выбор  $\text{tg}\delta$  в качестве основного критерия степени старения XLPE – изоляции и предложен алгоритм контроля критерия в режиме эксплуатации; 7) меры по оптимизации параметров испытательного напряжения СНЧ для контроля состояния изоляции после прокладки и монтажа КЛ высокого напряжения; 8) магнитные экраны с зазором (концентраторы магнитного поля) для трёхфазных КС, проложенных однофазным кабелем, позволяющие обеспечить выполнение требований по электромагнитной совместимости и экологии.

#### **4. Оценка содержания диссертации и автореферата**

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка литературы и тома 2 с приложениями.

**Во введении** обоснована актуальность решаемой проблемы, проведено сопоставление с ранее известными исследованиями, отражены цели и задачи, применяемые методы, научная новизна и практическая ценность, апробация работы, количество публикаций и личное участие соискателя.

**В первой главе** диссертации (стр. 22-42) представлен анализ проблемы комплексной оценки состояния XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения. Показано, что необходимо: 1) повышение достоверности и эффективности расчёта допустимой токовой нагрузки КЛ; 2) развивать методику испытаний КЛ сверхнизкой частотой; 3) разработка надёжных высоковольтных, сильноточных низко индуктивных XLPE – кабелей; 4) оптимизация кабельных муфт высокого напряжения для повышения их ресурса; 5) развитие методов анализа процесса старения изоляции; 6) способов экранирования магнитного поля КЛ.

**Во второй главе** обосновано первое научное положение (стр. 43-88). Разработан комбинированный подход для расчёта нагрузочной способности высоковольтных КС и рассмотрено развитие способа испытаний СНЧ.

**В третьей главе** обосновано второе научное положение (стр. 89-122). Автором впервые разработаны и обоснованы оригинальные теоретические и конструкционные решения по оптимальной конструкции XLPE – кабелей специального назначения для импульсных систем среднего напряжения.

**В четвёртой главе** обоснованы с третьего по шестое научные положения (стр. 123-174). Впервые предложен новый комбинированный подход для оптимального способа снижения неравномерности распределения

электрического поля в усиливающейся изоляции кабельных муфт высокого напряжения, проанализирован ресурс работы КЛ.

**В пятой главе** обосновано седьмое научное положение (стр. 175-219). Рассмотрены методы повышения безопасности работы КЛ путём оптимизации конструкции магнитных экранов.

**В заключении** приведены основные выводы по работе (стр. 219-221).

**Список литературы** включает 136 цитируемых автором отечественных и зарубежных литературных источников.

Том 2 включает 8 приложений на 97 с.

Диссертация Грешнякова Георгия Викторовича и автореферат оформлены с соблюдением установленных требований, предъявляемых к докторским диссертациям.

Текст автореферата в полном объёме соответствует материалу, изложенному в диссертации.

Основные научные положения и результаты диссертационной работы достаточно полно отражены в 36 печатных работах, в том числе в 25 статьях (из них 12 статей в изданиях, рекомендованных ВАК), в 3 патентах на полезные модели, 8 научных докладах, материалы трёх докладов опубликованы в изданиях, входящих в систему цитирования Scopus.

## **5. Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертационной работы**

Установленные в диссертационной работе результаты уже нашли широкое практическое применение в электрических сетях, на промышленных предприятиях, в научно-исследовательских организациях при изучении свойств электротехнических материалов и изделий, совершенствовании и разработке новых материалов и конструкций элементов КЛ и КС, также результаты работы могут быть полезны в учебном процессе при подготовке студентов и аспирантов.

## **6. Замечания, вопросы и дискуссионные положения**

1. При разработке методики оценки нагрузочной способности силовых XLPE – КС на базе связанного электромагнитного и температурного расчёта соискатель рассматривает решение в 2D постановке (уравнения 2.1 и 2.3) и приводит 2D картины распределения магнитного и теплового полей

(например, рис. 2.7, рис. 2.10 в диссертации), при этом утверждается, что создана методика оценки пропускной способности при любых условиях и способах прокладки (1 практический результат), что вероятнее утверждать при рассмотрении 3D моделей. Остаётся неясным, оценивалось ли влияние количества, типа и размера конечных элементов на точность и погрешность получаемых результатов при совместном решении задачи анализа магнитного поля переменных токов и задачи анализа температурного поля на одной и той же сетке конечных элементов.

**2.** Во второй главе (параграфы 2.4-2.5) приведено сравнение существующих методик диагностики состояния изоляции с помощью испытаний СНЧ и рассматривается развитие методики на КЛ 110 кВ с учётом ограничения по уровню выходного напряжения сертифицированного оборудования. Автор рекомендует для КЛ 110 кВ снизить испытательное напряжение с  $3 U_0$  до  $1,3 U_0$  и увеличить время испытаний с 30 до 70 минут. При этом из текста диссертации остаются неясными подробности исследования автором проблемы, указанной им на стр. 79 о том, как влияет напряжение СНЧ на характеристики изоляционных материалов, как зависят результаты от способа сшивки полиэтилена и как находить компромисс, нужно ли повышать испытательное напряжение или остановиться, чтобы не допустить пробоя. Обоснован ли автором дополнительно к ранее известным фактам вывод на стр. 88 о том, что метод испытания СНЧ является неразрушающим, и позволяет проводить диагностику без образования объёмного заряда.

**3.** В параграфе 3.3 соискатель приводит результаты исследования о сохранении свойств изоляции на примере кабелей марки ИПвПнг-НФ-1х400/400-12 и ИПвПнг-НФ-1х120/120-12 в процессе эксплуатации при воздействии рабочих импульсов тока специальной формы. Автор рассматривает задачу нестационарного теплового режима, при этом неясно, проводились ли какие-либо физико-химические исследования после воздействия импульсов тока на образцах изоляции для формирования вывода о том, что изоляция сохраняет свои свойства. Как следует из текста диссертации, в расчётную компьютерную модель закладывались дополнительно зависимости теплопроводности и теплоёмкости XLPE – изоляции от температуры, но не вводились законы старения изоляции.



4. В четвёртой главе автор приводит утверждение, что контроль значений тангенса угла диэлектрических потерь для каждой гармоники в процессе эксплуатации можно проводить по информации о результатах измерения уровня частичных разрядов с помощью спектрального анализа электромагнитного поля излучаемого концевой муфтой. Остается открытым вопрос, была ли проведена соискателем оценка, какова погрешность данного метода в условиях действующих объектов энергетики.

5. На стр. 186-187 приводятся данные о том, что для оптимизации конструкции магнитных экранов для КЛ применялся генетический алгоритм, однако, нет чётких разъяснений в необходимости его использования, например, по сравнению с методом перебора, так как по данным табл. 5.2 для решения потребовалось всего 20 итераций. Требуется уточнение, что принято за критерий останова работы алгоритма, с какой точностью при этом получено решение, как подбирались настройки ГА (число особей и т. п.), применялся ли готовый программный продукт или автор сам разрабатывал программный код ГА и совмещал его с расчётом магнитного поля.

6. На стр. 59 автор получает вроде бы очевидный результат о том, что прокладка КЛ с расположением фаз в горизонтальной плоскости с зазором в диаметр кабеля оказывается термически более выгодна, чем прокладка треугольником встык. Далее, на стр. 197, автор приводит тезис о том, что существенный эффект экранирования МП с помощью предлагаемых в работе магнитных экранов наблюдается при прокладке трёхфазной КЛ однофазным кабелем треугольником встык. Какой вариант оптимален для обоих критериев для практики эксплуатации?

7. Соискатель в каждой главе приводит разработанные им новые подходы, методы исследования и оптимизации конструкций, режимов работы КС, а также многочисленные примеры и эффекты от их внедрения. При этом отсутствует сводный параграф, где был бы представлен общий полезный эффект, безусловно достигнутый автором, по цели диссертационной работы сформулированной как повышение эксплуатационной надёжности и безопасности КЛ 6-35 и 110 кВ.

8. Замечания редакционного плана: (1) по тексту работы встречаются смещённые на разные страницы названия таблиц, рисунков и их содержание, например, стр. 72-73 табл. 2.6, стр. 135-136 рис. 4.11, стр. 19-20 рис. 13 в

автореферате; (2) в ряде случаев по тексту наблюдается небрежное оформление формул и графического материала, затрудняющего их восприятие и оценку, (3) стр. 141 подписи к осям рис. 4.18 на английском языке; (4) на рис. 3.3 стр. 95, имеется двойная нумерация – внутри подпись рис. 2; (5) в ряде случаев в тексте пропущены пробелы, в автореферате пропущено слово «магнитного» в подписи к рис. 19; (6) на стр. 125 смещено относительно текста обозначение  $C_0$  и т.п.; (7) по-видимому, опечатка с общим количеством печатных работ, указанных автором в автореферате на стр. 9 и в диссертации на стр. 20-21, а также нумерацией научных положений и выводов.

*Перечисленные замечания носят рабочий дискуссионный характер, не снижают научную, практическую ценность диссертации и положительное впечатление о диссертационной работе Грешнякова Г.В.*

#### **7. Заключение о соответствии диссертации критериям, установленным Положением о порядке присуждения учёных степеней**

Диссертационная работа Грешнякова Г.В. является самостоятельной законченной научно-квалификационной работой, обладает внутренним единством, актуальностью, новизной и практической значимостью, соответствует паспорту специальности 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия. Выдвинутые научные положения, установленные выводы и рекомендации, сформулированные в диссертации, оригинальны, обоснованы и достоверны. Основные научные результаты достаточно опубликованы, одобрены на международных и российских конференциях. Автореферат соответствует основному содержанию диссертации.

В диссертации на основании выполненных автором исследований ***решена научно-техническая проблема, имеющая важное хозяйственное значение***, которое заключается в теоретическом обосновании комплексных подходов и методов исследования с оптимизацией конструкций и режимов работы отдельных элементов XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения, повышающих их надёжность и безопасность в условиях эксплуатации.

Считаю, что по совокупности выполненных исследований, разработанных теоретических положений, полученных результатов, их научной и практической значимости, диссертационная работа Грешнякова Георгия Викторовича «Комплексная оценка технических и эксплуатационных характеристик XLPE – кабельных систем среднего и высокого напряжения» удовлетворяет критериям, предъявляемым к научно-квалификационным работам на соискание учёной степени доктора технических наук согласно п.п. 9-14 Положения о присуждении учёных степеней от 24 сентября 2013 г. № 842 с изменениями постановления Правительства Российской Федерации от 21 апреля 2016 г. № 335 «О внесении изменений в Положение о присуждении учёных степеней», а её автор, Грешняков Георгий Викторович, заслуживает присуждения ему учёной степени доктора технических наук по специальности 05.09.02 – Электротехнические материалы и изделия.

Официальный оппонент: доктор технических наук (специальность 05.09.02), доцент, профессор кафедры «Электрические станции, сети и системы электроснабжения», Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)», ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

Коржов Антон Вениаминович

«20» августа 2018 г.

Почтовый адрес: 454080, г. Челябинск,  
проспект Ленина, 76, <http://www.susu.ru>  
Телефон: +7 (351) 267-92-41  
Электронный адрес: [korzhovav@susu.ru](mailto:korzhovav@susu.ru)



интовед

Подпись Коржова Антона Вениаминовича заверяю