

На правах рукописи



ЗАЙЦЕВ Евгений Сергеевич

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ
СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ
КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 – 500 кВ**

Специальность: 05.14.02 «Электрические станции и
электроэнергетические системы»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иваново 2016

Работа выполнена на кафедрах «Автоматическое управление электроэнергетическими системами» и «Теоретические основы электротехники и электротехнологии» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина».

Научный руководитель:

кандидат технических наук, доцент **Лебедев Владимир Дмитриевич**

Официальные оппоненты:

Титков Василий Васильевич – доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого», заведующий кафедрой «Техника высоких напряжений, электроизоляционная и кабельная техника»

Ведерников Александр Сергеевич – кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет», декан электротехнического факультета

Ведущая организация: Открытое акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский, проектно-конструкторский и технологический институт кабельной промышленности» (ОАО «ВНИИКП»), г. Москва

Защита состоится « 3 » марта 2017 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 212.064.01 при ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина» по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, корпус Б, ауд. 237.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенные печатью организации) просим направлять по адресу: 150003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, 34, Учёный совет ИГЭУ. Тел.: (4932) 38-57-12, факс (4932) 38-57-01, e-mail: uch_sovet@ispu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Ивановского государственного энергетического университета.

Текст диссертации размещен http://ispu.ru/files/Dissertaciya_Zaycev_ES_tom_1.pdf

Автореферат диссертации размещен на сайте ИГЭУ www.ispu.ru.

Автореферат разослан _____ 2017 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 212.064.01,
доктор технических наук, доцент



Бушуев Евгений Николаевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. В настоящее время в электрических сетях России происходит активное внедрение в эксплуатацию высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена. Это особенно актуально для крупных городов со сформировавшейся архитектурой, поскольку площади отчуждения кабельных линий (КЛ) значительно меньше, чем у воздушных.

Надежность функционирования кабельных линий определяется их техническим состоянием и условиями работы, которые необходимо контролировать. Так, в разделе 2.1.2 Положения ОАО «Россети» о единой технической политике в электросетевом комплексе указано, что при планировании схемы развития Единой национальной электрической сети (ЕНЭС) должны предусматриваться системы мониторинга (автоматической диагностики) допустимой загрузки оборудования и ЛЭП в режиме реального времени.

Одной из основных причин, приводящих к повреждению электрооборудования при коротких замыканиях и перегрузках на КЛ, является превышение температуры. Существующие токовые защиты ЛЭП производят сравнительно быстрое отключение объекта при КЗ, обеспечивая при этом защиту объекта от последствий длительного протекания тока. Однако повышение температуры контролируется лишь косвенно по значению длительности протекания тока и не учитывает температурные свойства объекта и температуру окружающей среды. В то же время температура КЛ может недопустимо возрастать и в режимах отсутствия КЗ, например, вследствие возрастания тока нагрузки. Недостаточная чувствительность и точность РЗ в этом режиме также приводит к повреждениям кабелей. Поэтому одним из эффективных средств защиты КЛ от тепловых перегрузок может стать температурная защита на основе тепловой модели КЛ, что позволит контролировать непосредственно температуру кабелей и сравнительно просто учитывать процессы нагрева и охлаждения при изменяющемся токе. Важным показателем при этом является текущая абсолютная температура материала изоляции, зависящая непосредственно от внешних условий теплоотвода.

В высоковольтных кабельных линиях магистральных электрических сетей задачу мониторинга температуры и допустимой загрузки (пропускной способности) решают с помощью аппаратных средств мониторинга распределённой температуры на поверхности кабеля либо его экрана, расположенного также вблизи поверхности кабеля. Для этого оптоволоконные датчики температуры прикрепляются к поверхности кабелей или монтируются в их экраны на стадии производства. Эти средства позволяют контролировать температуру кабелей в режиме реального времени по всей длине КЛ.

Однако низкая теплопроводность изоляции кабеля приводит к достаточно высокому температурному градиенту, поэтому температура наиболее нагретого участка в сечении кабеля (вблизи жилы) значительно отличается от измеренной температуры, а в переходных режимах эта разница может увеличиваться в несколько раз. Следовательно, при определении режимов работы КЛ опираться только на результаты проектных расчётов и результаты измерений температуры поверхности кабелей без динамических расчётов в режиме реального времени недостаточно. Кроме того, для выполнения превентивных мер по созданию оптимальных токовых нагрузок КЛ, обеспечивающих непрерывность электроснабжения потребителей и снижение вероятности возникновения аварийных событий, необходимо прогнозирование изменения температуры кабеля. Поэтому актуальна задача определения пропускной способности КЛ на основе расчета температурных процессов КЛ в режиме реального времени и создания математического алгоритма для определения температуры жил КЛ на основе данных системы температурного мониторинга, позволяющего прогнозировать изменение температуры с учетом изменения нагрузки линии и внешних условий теплоотвода.

Проблемам, связанным с надёжностью, пропускной способностью и тепловыми режимами работы высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена, посвящены исследования многих отечественных и зарубежных учёных: Ю.А. Лаврова, В.В. Титкова, М.В.

Дмитриева, Г.А. Евдокунина, Г.В. Грешнякова, С.Д. Ковалёва, С.Д. Холодного, Э.Т. Лариной, В.Л. Овсиенко, F.C. Van Wormer, J.H. Neher, M.H. McGrath, A. Morello, F.H. Buller, H. Goldenberg, J.F. Affolter, M.A. El-Kady, G.J. Anders и др.

Существующие методики расчёта теплового режима и пропускной способности КЛ, разработанные указанными авторами, решают близкие по сути задачи, подходящие для проектных расчётов, но не для режима реального времени. Поэтому, несмотря на достаточно глубокую проработку этих вопросов, новые технические возможности систем мониторинга распределённой температуры делают актуальной проблему совершенствования существующих математических моделей для решения задачи расчёта и прогнозирования температур жил кабелей, а также оценки пропускной способности КЛ в режиме реального времени.

Кроме того, актуальна разработка полевых математических моделей кабельных линий, которые позволяют одновременно учитывать разные по природе физические эффекты. Это обусловлено в том числе и тем, что возросшая вычислительная мощность ЭВМ привела к возможности создавать полевые модели на основе метода конечных элементов, в которых можно совместно решать уравнения теплового и электромагнитного полей с учётом электрической схемы соединения металлических частей конструкции кабелей.

Целью работы является разработка математических моделей и алгоритмов для оценки пропускной способности, расчёта и прогнозирования температур жил КЛ в режиме реального времени на основе данных о конструкции КЛ, измеренной температуре в экранах, и параметров окружающей среды.

Основные задачи, решаемые в работе. Для достижения поставленной цели в работе поставлены и решены следующие основные задачи.

1. Анализ численных и аналитических методов расчёта пропускной способности, температуры и электрических параметров высоковольтных кабельных линий с СПЭ изоляцией.

2. Разработка математических моделей электромагнитного синусоидального поля и теплового стационарного поля коаксиального кабеля на основе аналитического решения уравнений Максвелла и Фурье для исследования этих полей, а также для верификации и оценки адекватности более сложных численных моделей на основе метода конечных элементов.

3. Разработка математических моделей для совместного расчёта теплового и электромагнитного полей в сечении КЛ, проложенных в грунте, на основе метода конечных элементов для проектирования КЛ, исследования тепловых режимов КЛ и оценки адекватности разрабатываемых математических алгоритмов.

4. Разработка математических моделей и алгоритмов для прогнозирования и расчёта текущих температур жил КЛ с СПЭ изоляцией в режиме реального времени на основе данных о параметрах кабелей, токовой нагрузке жил и распределённой температуре экранов.

5. Разработка математического алгоритма оценки пропускной способности КЛ в режиме реального времени с учётом действительных условий окружающей среды.

6. Физическое моделирование и экспериментальное исследование теплового поля высоковольтного кабеля с полиэтиленовой изоляцией для проверки адекватности математического моделирования.

7. Разработка структуры тепловой защиты КЛ, а также принципов и алгоритмов использования разрабатываемых моделей для целей автоматики, релейной защиты и диагностики КЛ.

Методы исследования. В ходе решения поставленных задач использовались методы теории электротехники, электротепловая аналогия, метод сосредоточенных теплоёмкостей, аналитические методы интегрирования, численные методы, включая метод конечных элементов, методы определения допустимых токовых нагрузок в соответствии с IEC 20687, а также физическое моделирование. В работе использованы программные комплексы и заложенные в них функции и алгоритмы Mathcad, MATLAB, COMSOL Multiphysics и др.

Научная новизна. В диссертационной работе получены следующие основные научные результаты.

1. Математическая модель и анализ результатов исследования на основе решения уравнений Максвелла для электромагнитного синусоидального поля однофазного бронированного кабеля с учётом поверхностного эффекта от внутренних проводников.

2. Математические модели на основе численного расчёта взаимосвязанных тепловых и электромагнитных полей в кабельных линиях с изоляцией из сшитого полиэтилена, позволяющие исследовать температуру в сечении кабелей в переходных и установившихся режимах, а также определять допустимую токовую нагрузку с одновременным учётом разных по природе физических эффектов и электрической схемы соединения металлических частей конструкции кабелей.

3. Математические модели и алгоритмы для прогнозирования и расчёта текущих температур жил КЛ с СПЭ изоляцией в режиме реального времени на основе данных о параметрах кабелей, токовой нагрузке жил и распределённой температуре экранов.

4. Математический алгоритм оценки допустимой токовой нагрузки КЛ с СПЭ изоляцией в режиме реального времени с учётом действительных коэффициентов токов в экранах и сопротивления грунта.

5. Структура тепловой защиты высоковольтной кабельной линии электропередачи с СПЭ изоляцией, построенная на основе разработанных алгоритмов.

6. Математический алгоритм для расчета активных сопротивлений металлических элементов конструкции КЛ с СПЭ изоляцией в режиме реального времени с учётом зависимости проводимости от температуры этих элементов, распределённой вдоль кабелей.

7. Алгоритм оценки теплового износа СПЭ изоляции высоковольтных КЛ в режиме реального времени с учётом динамики распределённой температуры жил.

Достоверность результатов компьютерного моделирования методом конечных элементов подтверждается совпадением с аналитическими решениями на основе классической теории электромагнитного и теплового полей, совпадением с результатами физического эксперимента по нагреву цилиндрической конструкции, аналогичной коаксиальному высоковольтному кабелю, а также с данными экспериментов, опубликованных в работах других авторов. Достоверность расчётов с помощью разработанных алгоритмов подтверждается их совпадением с результатами расчётов на основе метода конечных элементов, с результатами физического эксперимента по нагреву цилиндрической конструкции, аналогичной коаксиальному высоковольтному кабелю и с данными экспериментов, опубликованных другими авторами.

Соответствие паспорту специальности

Соответствие диссертации формуле специальности: в соответствии с формулой специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы» – в диссертационной работе **объектом исследования** являются кабельные линии напряжением 110-500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена, проложенные в грунте и системы мониторинга распределённой температуры и пропускной способности; **предметом исследований** – особенности режимов работы подземных кабельных линий, влияющие на пропускную способность, методы расчёта пропускной способности, температуры и электрических параметров КЛ с СПЭ изоляцией в режиме реального времени.

Соответствие диссертации области исследования специальности: отражённые в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.14.02 «Электрические станции и электроэнергетические системы», а именно:

• п. 6 «Разработка методов математического и физического моделирования в электроэнергетике» соответствуют полученное аналитическое решение уравнений Максвелла для электромагнитного синусоидального поля однофазного бронированного кабеля; разработанные математические модели взаимосвязанных тепловых и электромагнитных полей в КЛ с СПЭ изоляцией, проложенных в грунте; созданные математические модели в виде тепловых схем замещения трёхфазных КЛ, проложенных в грунте треугольником и в

плоскости; разработанные математические алгоритмы для прогнозирования и расчёта текущих температур жил, а также оценки пропускной способности КЛ в режиме реального времени.

• п. 9 «Разработка методов анализа и синтеза систем автоматического регулирования, противоаварийной автоматики и релейной защиты в электроэнергетике» соответствуют алгоритм расчёта активных сопротивлений кабелей с учётом зависимости проводимости от температуры для реализации измерительных органов адаптивных защит линий электропередачи и решения задачи ОМП, разработанная структура тепловой защиты высоковольтных КЛ с СПЭ изоляцией.

• п. 13 «Разработка методов использования ЭВМ для решения задач в электроэнергетике» соответствуют разработанные математические алгоритмы для расчёта и прогнозирования нагрева и пропускной способности высоковольтных КЛ с СПЭ изоляцией, предназначенные для использования в качестве программного обеспечения для системы мониторинга пропускной способности высоковольтных КЛ с СПЭ изоляцией.

Практическая ценность работы, по мнению автора, заключается в следующем.

1. Аналитическое решение уравнений Максвелла для электромагнитного поля однофазного бронированного кабеля позволяет определять частотные характеристики металлических элементов конструкции и рассчитывать потери активной мощности в них при разных частотах тока с учётом поверхностного эффекта от внутренних проводников.

2. Созданные математические модели теплового и электромагнитного полей кабельных линий с СПЭ изоляцией представляют практический интерес для расчета допустимой токовой нагрузки КЛ в целях проверки правильности выбора марки кабеля, способа прокладки КЛ и заземления экранирующих оболочек на стадии проектирования.

3. Созданный алгоритм расчёта температур жил КЛ позволяет контролировать максимальную температуру в изоляции кабелей в режиме реального времени.

4. Разработанный алгоритм прогнозирования нагрева жил кабелей позволяет во время эксплуатации КЛ предсказать перегрев изоляции и создаёт возможность предотвратить аварию на линии.

5. Алгоритм оценки пропускной способности позволяет во время эксплуатации КЛ определить её текущую фактическую пропускную способность с учётом действительных коэффициентов токов в экранях и сопротивления грунта.

6. Разработанная на основе созданных алгоритмов структура тепловой защиты высоковольтных КЛ с СПЭ изоляцией позволит увеличить чувствительность и селективность всей релейной защиты ЛЭП за счёт контроля и прогнозирования температуры в режиме реального времени.

7. Разработанный математический алгоритм расчёта активных сопротивлений кабелей с учётом зависимости проводимости от температуры позволит в режиме реального времени уточнять удельные активные сопротивления металлических элементов конструкции кабелей с учётом их распределённой температуры вдоль линии, что будет полезно при реализации измерительных органов адаптивных защит ЛЭП и решении задач ОМП.

8. Предложенный алгоритм оценки теплового старения СПЭ изоляции высоковольтных КЛ с учётом изменяющейся температуры жилы в режиме реального времени позволит предсказывать оставшийся срок службы кабелей во время эксплуатации.

Внедрение результатов работы. Результаты научных исследований на тему «Моделирование и расчёт температурного поля в сечении высоковольтной кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена» приняты в ООО «НТ ВКС» для разработки мероприятий, повышающих пропускную способность и надёжность электроснабжения при прокладке высоковольтной кабельной линии по дну Финского залива.

Разработанные математические алгоритмы расчёта температур жил КЛ и оценки её пропускной способности приняты в ООО «Димрус» (г. Пермь) для внедрения в программное обеспечение комплексной системы мониторинга технического состояния высоковольтных кабелей 110 – 500 кВ в целях контроля фактической пропускной способности ВКЛ в режиме реального времени. Одна из таких систем введена в эксплуатацию на воздушно-кабельной линии 500 кВ от Южноуральской ГРЭС-2 до ПС «Шагол» и Троицкой ГРЭС.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Математическая модель и анализ результатов на основе аналитического решения уравнений Максвелла для электромагнитного синусоидального поля однофазного бронированного кабеля с учётом поверхностного эффекта от внутренних проводников.

2. Математические модели взаимосвязанных тепловых и электромагнитных полей в КЛ с СПЭ изоляцией с учётом разных по природе физических эффектов и электрических схем соединения металлических оболочек кабелей.

3. Математические модели и алгоритмы для прогнозирования и расчёта текущих температур жил КЛ с СПЭ изоляцией в режиме реального времени на основе данных о параметрах кабелей, токовой нагрузке жил и распределённой температуре экранов.

4. Математический алгоритм оценки допустимой токовой нагрузки КЛ с СПЭ изоляцией в режиме реального времени.

5. Структура тепловой защиты высоковольтных КЛ с СПЭ изоляцией.

6. Математический алгоритм для расчёта активных сопротивлений металлических элементов конструкции кабелей с учётом зависимости их проводимости от распределённой температуры вдоль КЛ.

7. Алгоритм оценки теплового износа СПЭ изоляции высоковольтных КЛ с учётом динамики распределённой температуры жил кабелей.

Личный вклад автора заключается в постановке конкретных задач исследования, сравнительном анализе существующих методов расчёта пропускной способности КЛ напряжением 110 – 500 кВ и методов расчёта температуры кабелей в переходных режимах; получении аналитического решения уравнений Максвелла для электромагнитного синусоидального поля однофазного бронированного кабеля; разработке математических моделей для исследования на ЭВМ статических и переходных тепловых режимов работы КЛ с СПЭ изоляцией, проложенных в грунте; разработке математических алгоритмов для расчета текущей температуры жил кабелей, прогнозирования их нагрева и оценки пропускной способности КЛ в режиме реального времени; создании алгоритма расчёта активных сопротивлений кабелей с учётом температурной зависимости; разработке структуры тепловой защиты высоковольтных КЛ, разработке алгоритма оценки теплового износа СПЭ изоляции высоковольтных кабелей.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы были представлены и обсуждены на региональных научно-технических конференциях студентов и аспирантов «Энергия-2011» – «Энергия-2016» в ИГЭУ (Иваново); VI международной научно-практической конференции «Повышение эффективности энергетического оборудования» в ИГЭУ (Иваново 2011 г.); V международной научно-технической конференции «Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB» в НТУ «ХПИ» (Украина, Харьков, 2011 г.); Международном научном семинаре имени Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики» на тему «Проблемы надёжности систем энергетики в рыночных условиях» в АзНИИПИИЭ (Азербайджан, Баку, 2012 г.); IV и VI международных научно-технических конференциях «Электроэнергетика глазами молодежи» в ЮРГПУ (НПИ) (Новочеркасск, 2013 г.) и в ИГЭУ (Иваново, 2015 г.); XVII и XVIII международных научно-технических конференциях «Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии «Бенардосовские чтения» в ИГЭУ (Иваново, 2013, 2015 гг.); XX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» в НИУ «МЭИ» (Москва, 2014 г.); XXII международной научно-технической конференции «Релейная защита и автоматика энергосистем 2014» (Москва); Международной конференции по компьютерным технологиям в физике и технике (Санкт-Петербург, 2014 г.), на V международной научно-технической конференции «Современные направления развития систем релейной защиты и автоматики энергосистем» (Сочи, 2015 г.).

Результаты диссертационной работы представлялись на конкурсах научно-исследовательских работ и стали победителями и призерами: всероссийский конкурс «Молодежные идеи и проекты, направленные на повышение энергоэффективности и

энергосбережения» (Диплом I степени и медаль, Ярославль, 2012 г.); конкурс докладов в рамках XX международной научно-технической конференции студентов и аспирантов «Радиоэлектроника, электротехника и энергетика» (Диплом II степени, Москва, 2014 г.); конкурс докладов в рамках VI международной научно-технической конференции «Электроэнергетика глазами молодежи» (Диплом III степени, Иваново, 2015 г.).

Работа выполнена в рамках госзаданий «Математическое моделирование и расчёты электромагнитных и тепловых полей интеллектуального высоковольтного оборудования подстанций энергосистем» (регистрационный номер 7.5318.2011) и №2428 «Методики расчета и методы исследования высоковольтного оборудования на математических моделях для интеллектуальной электроэнергетической системы с активно-адаптивной сетью» (номер государственной регистрации 11403040012).

Опубликованные работы. По результатам исследований и разработок опубликовано 25 печатных работ, в том числе 3 в журналах, рекомендованных ВАК РФ («Вестник ИГЭУ», «Электрические станции») и 2 работы в англоязычных журналах и сборниках, индексируемых в международной базе данных SCOPUS («Proceedings of International conference on computer technologies in physical and engineering applications», «Applied Mechanics and Materials»). Получено 2 свидетельства на регистрацию программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 93 наименований и 17 приложений (отдельный том). Общий объём диссертации составляет 280 страниц, из них основной текст – 169 страниц, список литературы – 9 страниц, приложения – 102 страницы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, отражена научная новизна и практическая значимость полученных результатов, дана общая характеристика работы.

В первой главе определён объект исследования, сформулированы основные вычислительные задачи, которые нужно решать в режиме реального времени для выполнения функций системы мониторинга пропускной способности высоковольтных КЛ. Произведён аналитический обзор существующих методик расчёта тепловых полей высоковольтных кабельных линий, проложенных в грунте.

Системы мониторинга распределённой температуры обычно устанавливают на кабельных линиях напряжением 110 кВ и выше. При этом максимальная длина оптоволоконного датчика по утверждению производителей таких систем может достигать 40 км. Поскольку кабели на напряжение 110–500 кВ, как правило, имеют однофазную конструкцию из-за большого поперечного сечения, а их длина редко достигает 30 км, объектом исследования являются подземные кабельные линии напряжением 110–500 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена пофазного исполнения.

На основе анализа литературных источников показано, что для решения задачи оценки реальной допустимой токовой нагрузки в режиме реального времени эффективно использовать формулу (2) из стандарта ИЕС 60287. В этой формуле коэффициенты тепловых потерь в металлических оболочках и тепловое сопротивление грунта могут быть определены по измеренным токам в жилах и оболочках кабелей, а также по измеренным значениям температур в экранах кабелей.

На основе анализа научных работ других авторов показано, что наиболее точным методом моделирования и расчёта пропускной способности и температуры КЛ является совместное решение уравнений электромагнитного и теплового полей методом конечных элементов (МКЭ), поскольку он позволяет учитывать наибольшее количество физических эффектов, влияющих на температуру жил и пропускную способность КЛ.

Однако использование МКЭ для расчётов в режиме реального времени неудобно ввиду высокой ресурсоёмкости моделей. Он хорошо подходит для выполнения проектных изысканий и предварительных расчётов до начала эксплуатации КЛ. Кроме того, его можно использовать

для оценки адекватности менее ресурсоёмких моделей, основанных на иных принципах расчёта.

В первой главе показано, что методики из стандарта ИЕС 60853 позволяют рассчитывать температуру кабелей в динамике только для постоянной во времени нагрузки, что подходит только для проектных изысканий. Применение формул из ИЕС 60853 для расчётов в режиме реального времени, когда закон изменения токовой нагрузки заранее не известен, невозможно. Также данная методика не позволяет производить расчёты, если не известны ненулевые начальные условия.

Для решения этой задачи некоторые авторы применяют интеграл свёртки (интеграл Дюамеля). Но его использование для расчётов в режиме реального времени является также неудобным, поскольку во время расчётов будет накапливаться большое количество слагаемых в формулах, которые учитывают предыдущие изменения тепловыделений. К тому же в этом случае нет возможности учитывать нелинейность модели, вызванную зависимостью тепловыделений от температуры и другими эффектами.

Построение однофазной тепловой схемы замещения, в которой влияние тепловыделений в металлических оболочках, а также влияние соседних фаз учитывается неявно в виде коэффициентов для тепловых сопротивлений и ёмкостей ограничивает её применение только для симметричных полнофазных режимов.

Ввиду того, что для соблюдения достаточной точности расчётов при построении тепловых схем замещения, учитывающих грунт, в разных работах его делят на разное число слоёв, необходимо дополнительное исследование этого вопроса.

На основании проведённого анализа научных работ в первой главе сформулированы основные задачи исследования.

Вторая глава посвящена разработке математических моделей для совместного решения уравнений теплопроводности и электромагнитного поля подземных высоковольтных КЛ в статике и в динамике с учётом электрической схемы соединения металлических оболочек кабелей.

Получены аналитические решения уравнений Максвелла для синусоидального электромагнитного поля однофазного бронированного кабеля марки НХЛМКСJ-W 1х2000 330кВ (производитель – Prysmian Cables and Systems) и уравнения теплопроводности Фурье для стационарного теплового поля однофазного кабеля 220 кВ с сечением жилы 1200 мм² и одной металлической оболочкой, находящегося в цилиндрическом слое грунта. С помощью этих решений произведена верификация и оценка адекватности численных математических моделей указанных полей, построенных на основе метода конечных элементов.

На основе решения уравнений Максвелла для электромагнитного поля получены выражения (1) и (2) для расчёта электрических параметров экрана и брони кабеля:

$$\begin{aligned} Z_{\varnothing} = \frac{k_{\varnothing}}{I_{\varnothing}^2 2\pi r_2 r_3 \gamma_{\varnothing} m_{\varnothing}} & \left[\frac{1}{J^1(k_{\varnothing} r_2)} \left[\dot{I}_{\varnothing} r_3 m_{\varnothing} - N^1(k_{\varnothing} r_2) \left(\dot{I}_{\varnothing} \left(r_2 J^1(k_{\varnothing} r_2) - r_3 J^1(k_{\varnothing} r_3) \right) + \dot{I}_{\varnothing} r_2 J^1(k_{\varnothing} r_2) \right) \right] \times \right. \\ & \times \left[\left(\bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_{\varnothing} \right) J^0(k_{\varnothing} r_3) - \bar{I}_{\varnothing} J^0(k_{\varnothing} r_2) \right] + \left(\dot{I}_{\varnothing} \left(r_2 J^1(k_{\varnothing} r_2) - r_3 J^1(k_{\varnothing} r_3) \right) + \dot{I}_{\varnothing} r_2 J^1(k_{\varnothing} r_2) \right) \times \\ & \left. \times \left[\left(\bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_{\varnothing} \right) N^0(k_{\varnothing} r_3) - \bar{I}_{\varnothing} N^0(k_{\varnothing} r_2) \right] \right]; \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} Z_B = \frac{k_B}{I_B^2 2\pi r_4 r_5 \gamma_B m_B} & \left[\frac{1}{J^1(k_B r_4)} \left[\left(\dot{I}_{\varnothing} + \dot{I}_{\varnothing} \right) r_5 m_B - N^1(k_B r_4) \left(\left(\dot{I}_{\varnothing} + \dot{I}_{\varnothing} \right) \left(r_4 J^1(k_B r_4) - r_5 J^1(k_B r_5) \right) + \right. \right. \\ & + \dot{I}_B r_4 J^1(k_B r_4) \left. \right] \left[\left(\bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_B \right) J^0(k_B r_5) - \left(\bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_{\varnothing} \right) J^0(k_B r_4) \right] + \left(\left(\dot{I}_{\varnothing} + \dot{I}_{\varnothing} \right) \left(r_4 J^1(k_B r_4) - \right. \right. \\ & \left. \left. - r_5 J^1(k_B r_5) \right) + \dot{I}_B r_4 J^1(k_B r_4) \right) \left[\left(\bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_B \right) N^0(k_B r_5) - \left(\bar{I}_{\varnothing} + \bar{I}_{\varnothing} \right) N^0(k_B r_4) \right] \right], \end{aligned} \quad (2)$$

где

$$k_{\varnothing, B} = \sqrt{-j\omega \mu_{a(\varnothing, B)} \gamma_{\varnothing, B}}; \quad (3)$$

$$m_{\varnothing} = \left(J^1(k_{\varnothing} r_2) N^1(k_{\varnothing} r_3) - N^1(k_{\varnothing} r_2) J^1(k_{\varnothing} r_3) \right); \quad (4)$$

$$m_B = (J^1(k_B r_4) N^1(k_B r_5) - N^1(k_B r_4) J^1(k_B r_5)). \quad (5)$$

Здесь $\dot{I}_{Ж,Э,Б}$, $\bar{I}_{Ж,Э,Б}$ – комплексные и комплексно-сопряжённые токи в жиле, экране или в броне соответственно, А; r_2 , r_3 , – внутренний и внешний радиусы экрана соответственно, м; r_4 , r_5 – внутренний и внешний радиусы брони соответственно, м; $\gamma_{Э,Б}$ – удельная проводимость экрана или брони соответственно, См/м; $J^{0,1}$ и $N^{0,1}$ – функции Бесселя первого и второго рода соответственно (верхний индекс обозначает порядок функций); ω – угловая частота тока, рад/с; $\mu_{a(Э,Б)}$ – абсолютная магнитная проницаемость, экрана или брони соответственно, Гн/м.

Полученные выражения позволяют определять параметры электрической схемы замещения бронированного кабеля с учётом поверхностного эффекта во внешних проводящих слоях кабеля от токов во внутренних проводящих слоях. Они могут быть полезны для расчета температуры кабеля в переходных электромагнитных режимах, а также для расчета параметров срабатывания релейной защиты, когда необходимо знать электрические характеристики схем замещения кабелей при наличии высших гармонических составляющих токов.

Во второй главе разработаны мультифизические модели на основе метода конечных элементов, которые одновременно учитывают следующие физические и конструктивные свойства высоковольтных кабельных линий:

- влияние эффекта близости и поверхностного эффекта на тепловые потери в жилах и экранах;
- взаимное влияние теплового и электромагнитного полей;
- изменение тока жил по суточному графику нагрузки;
- способ расположения однофазных кабелей;
- геометрические и физические свойства окружающей среды;
- схему соединения металлических элементов конструкции кабелей, в том числе при наличии неидеальной транспозиции.

Для разработки полученных моделей была произведена оптимизация удалённости внешней границы расчёта, которая влияет на количество конечных элементов, точность и быстродействие моделей. Вместе с тем получены уравнения, позволяющие сформулировать открытые граничные условия для стационарного теплового поля КЛ, проложенной в грунте.

В отличие от методики, изложенной в ИЕС 60287, эти модели позволяют оценивать пропускную способность КЛ любой конструкции, включая типовые, учитывать нелинейность параметров материалов, любую схему соединения металлических элементов конструкции кабелей. Поэтому они будут полезны для проектно-изыскательских работ. Кроме того, с помощью полученных моделей можно решать задачи электромагнитной совместимости, поскольку они позволяют определить распределение электромагнитного поля вокруг КЛ.

Исследования авторов Г.В. Грешнякова, С.Д. Дубницкого, Г.Г. Ковалёва, Н.В. Коровкина показывают, что допустимый ток, рассчитанный с помощью подобных моделей на 10–30% выше, чем ток, рассчитанный с помощью ИЕС 60287. Это обусловлено тем, что данный стандарт предполагает приближённый учёт увеличения потерь, обусловленных эффектом близости и поверхностным эффектом, а также увеличение потерь от вихревых и циркуляционных токов в экранах и в броне.

На основе расчётов различных режимов работы КЛ в динамике с помощью полученных моделей во второй главе показано, что они не обладают достаточным быстродействием, чтобы их можно было использовать для расчётов в режиме реального времени. Минимальное время расчёта составило 1048 с при том, что для системы мониторинга температуры требуется выполнять расчёты при тех же условиях за 15–30 с в режиме реального времени. Поэтому для решения задач, поставленных в главе 1, требуется разработка менее ресурсоёмких моделей, а полученные модели на основе метода конечных элементов будут использоваться для оценки адекватности других, менее сложных моделей, обладающих большим быстродействием и меньшей вычислительной ресурсоёмкостью.

Третья глава посвящена разработке тепловых схем замещения и математических алгоритмов для расчёта и прогнозирования температур жил высоковольтных подземных КЛ, а также созданию алгоритма определения фактической пропускной способности в режиме реального времени.

Разработана тепловая схема замещения, позволяющая моделировать тепловые переходные процессы в трёхфазной КЛ, проложенной в грунте, с учётом влияния тепловыделений в металлических оболочках и соседних фаз друг на друга (рис. 1). Расчёт тепловых сопротивлений и ёмкостей элементов конструкции кабелей (R_{Tu} , R_{To} , C_1 , C_2) можно выполнить по известным формулам из ИЕС 60853, поскольку тепловое поле внутри кабелей можно считать осесимметричным.

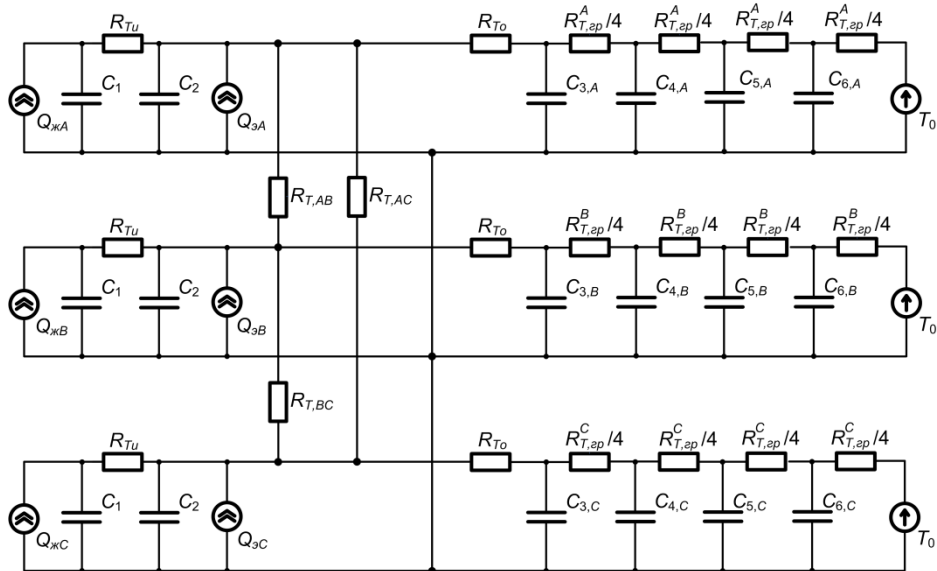


Рис. 1. Тепловая схема замещения для трёхфазной КЛ, проложенной в грунте

Тепловые сопротивления грунта каждой фазы ($R_{T,sp}^A$, $R_{T,sp}^B$, $R_{T,sp}^C$) и взаимные тепловые сопротивления между ними ($R_{T,AB}$, $R_{T,BC}$, $R_{T,AC}$) предложено вычислять с помощью полевых моделей и системы уравнений, составленных по методу узловых потенциалов для схемы (рис. 1) в установившемся режиме. Чтобы вычислить тепловые ёмкости $C_{3-6,(A,B,C)}$, предложено заменить реальное грунтовое пространство на эквивалентные цилиндрические грунтовые слои для каждой фазы в отдельности, а затем производить деление этих слоёв по методу Ван-Вормера. В диссертационной работе произведён расчёт этих сопротивлений и ёмкостей для четырёх способов укладки кабелей (рис. 2).

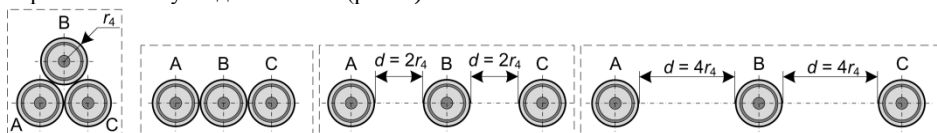


Рис. 2. Способы укладки кабелей в грунте

На основе тепловой схемы замещения для жилы и основной изоляции кабеля, построенной по методу Ван-Вормера (рис. 3), в третьей главе разработан математический алгоритм для расчёта температуры жилы в режиме реального времени. Расчёт переходного процесса в схеме предложено выполнять численно с помощью дискретных моделей (метод трапеций) на основе данных о температуре экрана и токовой нагрузке жилы.

На основе тепловой схемы замещения для подземной трёхфазной КЛ (рис. 1) разработан математический алгоритм для выполнения прогноза изменения температур жил кабельной линии, проложенной в грунте, в режиме реального времени.

Для оценки адекватности разработанных алгоритмов произведено сравнение результатов расчёта и прогнозирования температур с результатами расчёта температур, выполненных методом конечных элементов. Сопоставление показало, что погрешность алгоритма расчёта температур жил по известным температурам в экранах не превышает 1°C (рис. 4). В свою очередь, максимальная погрешность прогноза нагрева кабелей оказалась равной 8°C (7,3% от максимальной температуры кабелей) и уменьшается до $1 - 2^\circ\text{C}$ в процессе нагрева КЛ (рис. 5).

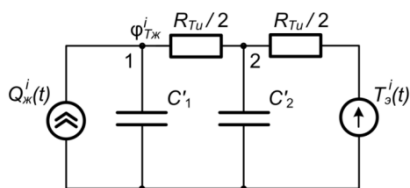


Рис. 3. Тепловая схема замещения для расчёта температуры жилы при известной температуре в экране

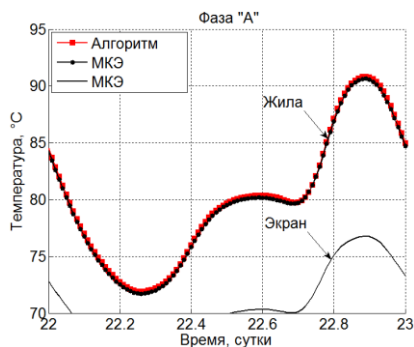
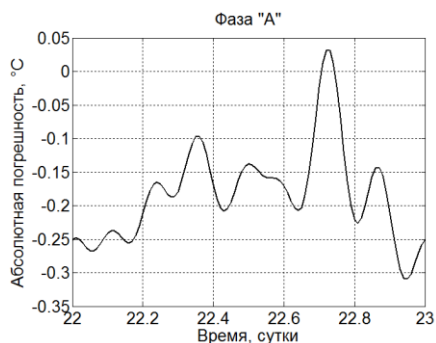


Рис. 4. Сравнение расчётов температуры жилы фазы «А» с помощью математического алгоритма и с помощью метода конечных элементов (МКЭ)



Показано, что полученные математические алгоритмы обладают достаточным быстродействием, чтобы иметь возможность совместного применения с системой мониторинга распределённой температуры экранов для расчёта температурных профилей жил и пропускной способности КЛ магистральных электрических сетей. Указанные алгоритмы позволяют за 12 с вычислить температурные профили жил с пространственным разрешением в 1 м и спрогнозировать их изменение на 2 суток вперёд. Вычисления производились на компьютере с частотой двухъядерного процессора $2 \times 2,26$ ГГц, объёмом оперативной памяти 4 Гб и 64 разрядной операционной системой.

На основе формулы (6) из ИЕС 60287 разработан математический алгоритм для оценки допустимой токовой нагрузки высоковольтной КЛ, проложенной в грунте.

$$I_{\text{дон}} = \sqrt{\frac{T_{\text{дон}} - T_0}{R_{\text{ж}}(R_{\text{Тл}} + R_{\text{То}} + R_{\text{Т(сп, факт)}}) + \bar{k}_{\text{факт}}^2 R_3(R_{\text{То}} + R_{\text{Т(сп, факт)}})}}, \quad (6)$$

где $T_{\text{дон}} = 90^\circ\text{C}$ – длительно допустимая температура жилы, $^\circ\text{C}$; $R_{\text{ж}}$, R_3 – электрические сопротивления жилы и экрана переменному току с учётом поверхностного эффекта и эффекта близости и температурного коэффициента сопротивления, Ом/м; $\bar{k}_{\text{факт}}$ – среднее за сутки значение фактического коэффициента тока в экране (определяется с помощью датчиков тока в жиле и экране); $R_{\text{Т(сп, факт)}}$ – фактическое тепловое сопротивление грунта тепловому потоку от кабеля, К·м/Вт, которое предложено определять по формуле

$$R_{T(зр,факт)} = \frac{\bar{T}_э - T_0}{\bar{Q}_k \left(1 - e^{-\frac{60t}{(R_{T0} + R_{T(экв,зр)})(C_0 + C_{экв,зр})}} \right)} - R_{T0}, \quad (7)$$

где $\bar{T}_э$ – среднее за сутки значение измеренной температуры экрана, °C; $\bar{Q}_k$ – среднее за сутки значение тепловыделения в кабеле, Вт/м; $R_{T(экв,зр)}$, $C_{экв,зр}$ – тепловые сопротивление и ёмкость эквивалентного цилиндрического слоя грунта, К·м/Вт и Дж/(кг·К) соответственно.

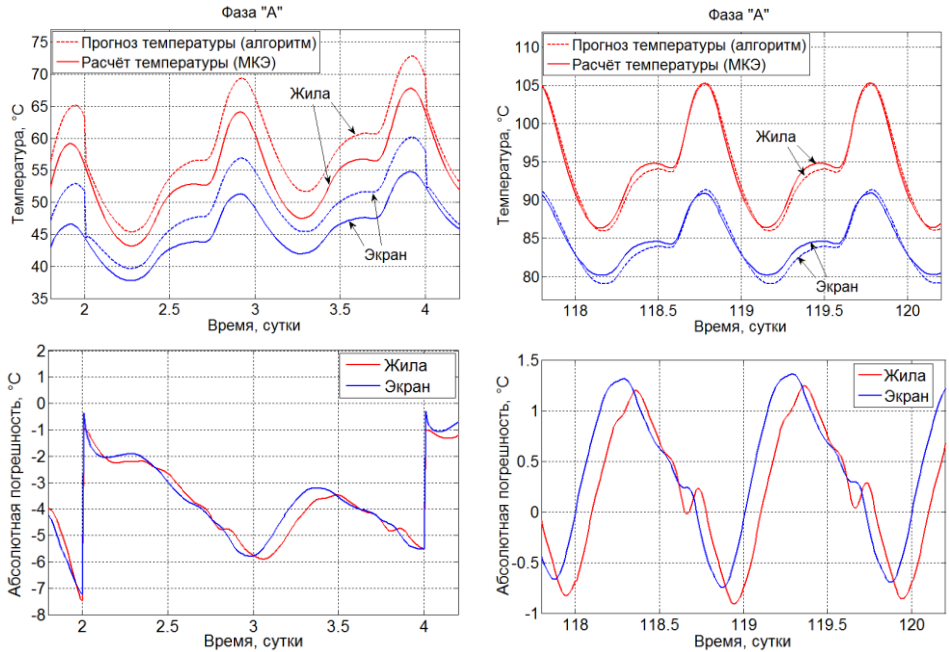


Рис. 5. Сравнение прогнозируемых и рассчитанных с помощью МКЭ температур для фазы «А»

Этот алгоритм был встроен в алгоритм расчёта температур жил в режиме реального времени, поскольку для учёта температурного коэффициента сопротивления для жилы требуется её температура. На рис. 6 представлен график оценки допустимого тока трёхфазной КЛ. По графику видно, что допустимый ток входит в область пятипроцентной погрешности через 14 суток после начала переходного процесса.

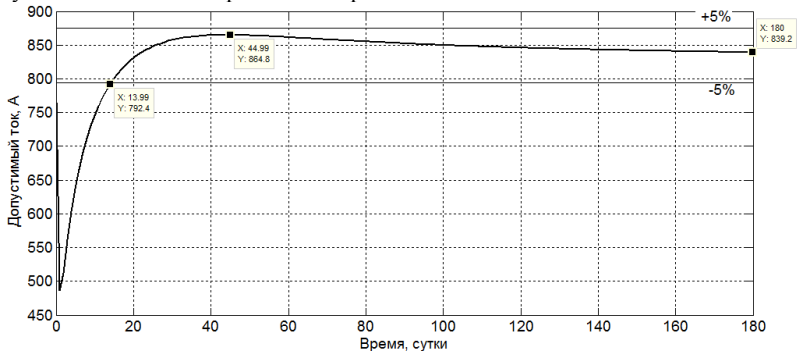


Рис. 6. Допустимый ток трёхфазной высоковольтной КЛ

Четвёртая глава посвящена физическому моделированию теплового поля в однофазном коаксиальном кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена и сопоставлению результатов физического и математического моделирования. На рис. 7 представлена схема экспериментальной установки и физической модели коаксиального кабеля.

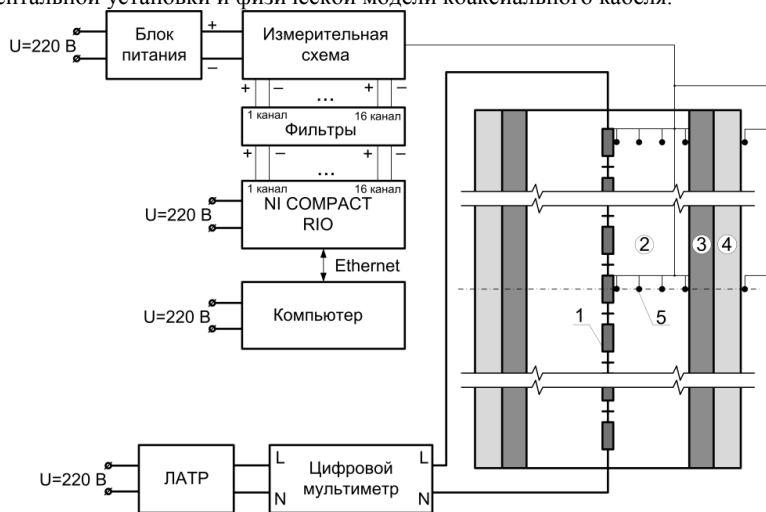


Рис. 7. Схема экспериментальной установки и физической модели: 1 – керамический резистор; 2 – силиконовый герметик; 3 – стеклотекстолит; 4 – силиконовая резина; 5 – датчик температуры

Были выполнены эксперименты, в которых через резистивный делитель пропускали ток с постоянной и переменной амплитудой, изменяемой по ступенчатому графику. Сопоставление результатов расчёта моделей с экспериментальными данными производилось в установившемся и переходном режимах.

В табл. 1 приведены относительные погрешности расчёта температур в месте расположения датчиков (δ), а также значения усреднённых экспериментальных температур датчиков (T^p) и соответствующих температур, полученных расчётным путём (T^p) для установившегося режима.

Таблица 1. Температуры и относительные погрешности их расчёта для статического режима

Величина	Датчики в верхней части конструкции				Среднее значение	Датчики в центре конструкции				Среднее значение
	1	2	3	4		5	6	7	8	
$T^p, ^\circ\text{C}$	26,8	31,1	38,1	67,2	-	30,4	36,8	46	85,3	-
$T^p, ^\circ\text{C}$	26	30,3	39,1	68,9	-	29	35,6	46,7	84,2	-
$\delta, \%$	3	2,6	2,7	2,6	2,73	4,8	3,4	1,5	1,3	2,75

Таким образом, можно сделать вывод о достаточной точности расчётов и адекватности математической модели стационарного теплового поля, построенной с помощью метода конечных элементов, поскольку средняя относительная погрешность расчёта температур в местах расположения датчиков не превышает 5%.

Расчёт нагрева физической модели коаксиального кабеля в динамике был выполнен с помощью двух методов: путём решения уравнения теплопроводности методом конечных элементов и с помощью тепловой схемы замещения.

В табл. 2 представлены максимальные и средние значения абсолютной и проведённой погрешностей для разных методов моделирования и трёх экспериментов. Приведённая погрешность вычислялась в отношении к максимальной опытной температуре за всё время эксперимента.

Из данных табл. 2 следует, что математические модели, основанные на тепловых схемах замещения и решении уравнения теплопроводности методом конечных элементов, адекватны, поскольку приведённые погрешности расчётов достигают 4,3 % и 6,1 % для МКЭ и ТСЗ соответственно, а их средние значения достигают лишь 2,1% и 1,3% для МКЭ и ТСЗ соответственно.

Таблица 2. Погрешности расчётов с помощью математических моделей

№ эксперимента		1	2	3
Максимальная абсолютная погрешность, °C	МКЭ	3	1,5	3
	ТСЗ*	2,7	5,2	3,1
Максимальная приведённая погрешность, %	МКЭ	4,3	1,7	3,4
	ТСЗ*	3,9	6,1	3,5
Средняя абсолютная погрешность, °C	МКЭ	1,5	0,4	0,6
	ТСЗ*	0,8	1,1	0,6
Средняя приведённая погрешность, %	МКЭ	2,1	0,5	0,7
	ТСЗ*	1,1	1,3	0,7

* ТСЗ – математическая модель на основе тепловой схемы замещения.

В пятой главе предложены методы применения разработанных математических моделей и алгоритмов для защиты и диагностики высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена.

Разработана структура тепловой защиты высоковольтной КЛ с СПЭ изоляцией (рис. 8), которая предполагает отключение КЛ в случае превышения текущей температуры жилы допустимого предела ($T > T_{доп}$) на любом участке линии. В случае превышения некоторого заданного предела температуры $T_{сигн} < T_{доп}$ защита должна сигнализировать об этом.

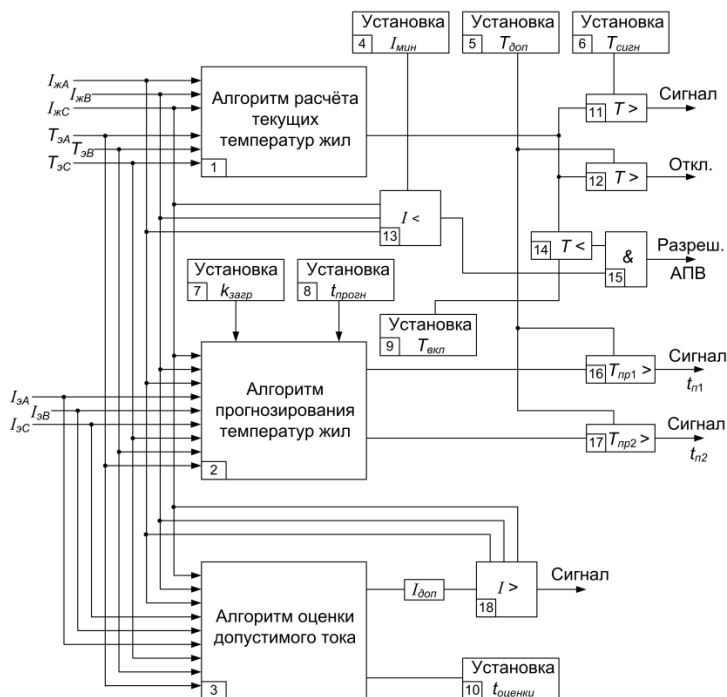


Рис. 8. Структура тепловой защиты КЛ

В предлагаемой структуре предусмотрено решение двух задач прогнозирования. Прогнозирование температур на некоторое время вперёд ($t_{прогн}$): 1 – при токе, изменяющемся

по графику за последние сутки; 2 – при токе, график которого будет выше последнего суточного графика на некоторый заданный коэффициент загрузки ($k_{згр}$). В случае превышения прогнозируемых температур ($T_{пр1}$, $T_{пр2}$) допустимого предела, защита должна вырабатывать команды на сигнал с указанием предполагаемого времени наступления перегрева ($t_{п1}$, $t_{п2}$).

Защита должна сигнализировать и в том случае, когда ток в линии превысил допустимую величину (рассчитанную с помощью разработанного алгоритма в блоке 3), а температура жилы ещё не достигла допустимого предела. При этом для оценки допустимого тока алгоритму требуется некоторое время ($t_{оценки}$).

Дополнительно в тепловой защите должен быть предусмотрен контроль повторного включения, основанный на выполнении двух условий: отсутствие тока в жилах и не превышение установленного уровня температуры включения ($T_{вкл}$).

Проявление поверхностного эффекта и эффекта близости зависит от электропроводности, которая, в свою очередь, зависит от температуры. Поэтому зависимость активного сопротивления кабеля переменному току от температуры имеет сложный характер. Для учёта этой зависимости разработан математический алгоритм для расчёта распределённых активных сопротивлений проводящих элементов конструкции кабелей с учётом зависимости удельной электрической проводимости от распределённой температуры этих элементов.

Поскольку температура на различных участках длины КЛ может отличаться, то необходимо рассчитывать удельное сопротивление для каждого сечения, в котором измеряется и рассчитывается температура с пространственным разрешением, зависящим от системы мониторинга распределённой температуры (рис. 9).

Используя данные от системы мониторинга распределённой температуры, установленной на одной из высоковольтных КЛ города Москвы, был произведён расчёт удельных сопротивлений жил кабелей с учётом их температурной зависимости. На рис. 10 представлен график удельного сопротивления жилы одного из кабелей вдоль участка трассы.

По графику видно, что удельное сопротивление меняется вдоль кабеля из-за изменения температуры. Суммарное сопротивление жилы для представленного графика составило 0,0574 Ом при средней температуре жилы 33,2 °С. Если не учитывать изменение температуры ($T_{жс} = 20$ °С), то полное сопротивление составит 0.0528 Ом, что на 8% меньше уточнённого.

Уточнённый расчёт активного сопротивления КЛ с учётом влияния распределённой температуры на проводимость металлических частей конструкции кабелей будет полезен при реализации измерительных органов адаптивных защит линий электропередачи, а также при решении задач ОМП.

Наличие данных о распределённой температуре жилы, поступающих в режиме реального времени, делает возможным оценку теплового износа изоляции кабелей в процессе эксплуатации. Для этого в пятой главе предложен математический алгоритм, основанный на формуле времени наработки (срок службы, $t_{сл}$) изоляции из сшитого полиэтилена:

$$t_{сл} = \frac{h_{Pl}}{kT} e^{\frac{\Delta H - T\Delta S}{kT}} \operatorname{csch}\left(q_e \lambda_a \frac{E}{kT}\right), \quad (8)$$

где h_{Pl} – постоянная планка Дж·с; ΔH – энтальпия активации, Дж; ΔS энтропия активации, Дж/К; q_e – элементарный заряд, Кл; λ_a – длина активации, м; E – напряжённость электрического поля, В/м.

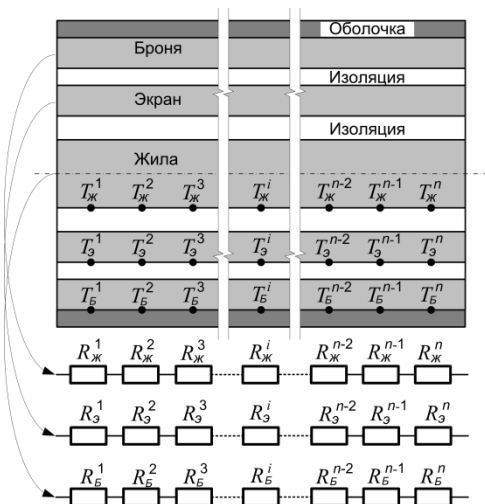


Рис. 9. Электрические сопротивления на участках контроля температуры кабеля

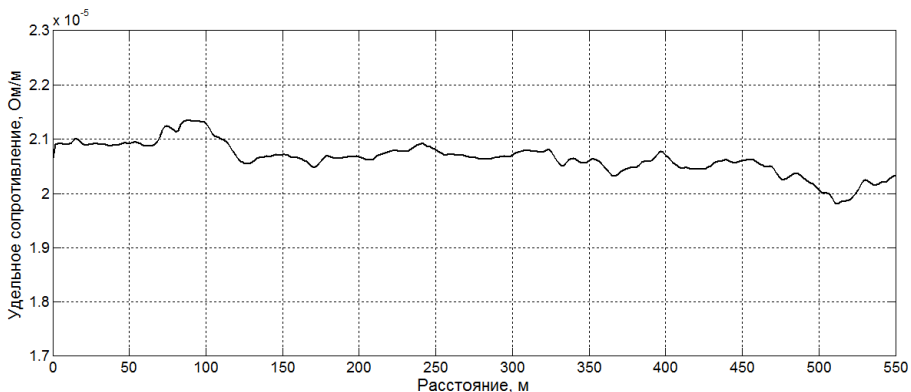


Рис. 10. График изменения удельного сопротивления жилы вдоль кабеля

Для оценки износа изоляции необходимо на каждом шаге измерения температуры экрана и расчёта текущей температуры жилы (рис. 11) вычислять относительную скорость износа изоляции:

$$V_i = \frac{v_i}{v_{ном}}, \quad (9)$$

где i – номер текущего измерения или шага расчёта алгоритма; $v = 1/t_{сл}$ – скорость износа изоляции (обратная величина срока службы), $1/c$; $v_{ном}$ – скорость износа изоляции при максимально допустимой температуре ($T_{ном} = 90^\circ C$), $1/c$.

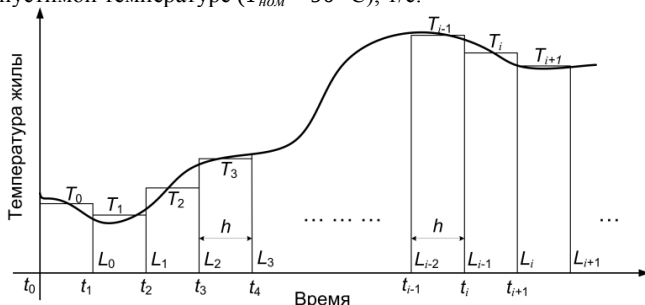


Рис. 11. График реальной и диаграмма рассчитанной температур жилы

Умножив скорость износа на время действия текущей температуры h и разделив на полное паспортное время службы кабеля t_n , можно получить относительный износ изоляции за промежуток времени между измерениями:

$$L_h = \frac{1}{t_n} V_i h \cdot 100\%. \quad (10)$$

Используя формулы (8) – (10), можно вычислить новое значение относительного износа изоляции кабеля после очередного измерения температуры экрана и расчёта текущей температуры жилы по формуле

$$L_i = L_{i-1} + \frac{1}{t_n} \frac{T_i}{T_{ном}} e^{\frac{\Delta H - T_{ном} \Delta S}{k T_{ном}} - \frac{\Delta H - T_i \Delta S}{k T_i}} \operatorname{sh} \left(q_e \lambda_a \frac{E}{k T_i} \right) \operatorname{csch} \left(q_e \lambda_a \frac{E}{k T_{ном}} \right) h \cdot 100\%, \quad (11)$$

где L_{i-1} – предыдущее значение относительного износа изоляции, %; T_i – текущее значение температуры жилы, определяемое с помощью разработанного алгоритма.

Таким образом, появится возможность контролировать тепловое старение изоляции КЛ в режиме реального времени с учётом изменяющейся в процессе работы температуры жилы.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Получены уравнения для параметров схемы замещения бронированного кабеля, позволяющие учитывать поверхностный эффект во внешних проводящих слоях от внутренних проводящих слоёв при любой частоте тока и при любой схеме соединения металлических оболочек кабеля.

2. Разработанные модели на основе совместного решения уравнений для теплового и электромагнитного полей методом конечных элементов позволяют с достаточной точностью учитывать тепловые и электромагнитные явления в их взаимосвязи, влияющие на нагрев и пропускную способность подземных КЛ. Кроме того, они позволяют учитывать электрическую схему соединения металлических элементов конструкции кабелей и открытые граничные условия для теплового поля. Однако ввиду своей высокой вычислительной ресурсоёмкости эти модели не подходят для расчётов в режиме реального времени. Их целесообразно использовать на стадии проектирования и в качестве эталонных моделей для оценки адекватности других, менее точных моделей.

3. Разработанные тепловые схемы замещения для подземных трёхфазных КЛ позволяют вычислять температуры жил кабелей в динамике с учётом тепловыделений в экранах и взаимного теплового влияния кабелей друг на друга при различных способах укладки кабелей. Погрешность расчётов в сравнении с полевыми моделями не превышает 6,5 %.

4. Разработанные математические алгоритмы для прогнозирования и расчёта текущих температур жил КЛ в режиме реального времени позволяют выполнять необходимые расчёты с достаточной точностью и быстродействием и могут быть использованы в системе мониторинга пропускной способности высоковольтных КЛ магистральных электрических сетей. Путём сравнения расчётов с полевыми моделями на основе МКЭ показано, что погрешности расчёта температур жил КЛ составляют десятые доли градуса, а прогнозирование нагрева кабелей производится с приведённой к максимальной температуре погрешностью, не большей 7,5%. При этом быстродействие алгоритмов превышает быстродействие полевых моделей в сотни раз и позволяет выполнять прогнозирование нагрева кабелей за 12 с для КЛ длиной 18 км.

5. Разработанный алгоритм оценки допустимой токовой нагрузки при использовании совместно с измерительными средствами распределённой температуры и токов кабелей позволит определять фактическую пропускную способность КЛ магистральных электрических сетей с учётом фактического теплового сопротивления грунта и фактического коэффициента тока в экранах.

6. Адекватность разработанных моделей оценивалась путём сравнения с аналитическими моделями на основе решения уравнений теплопроводности и электромагнитного поля, а также с экспериментальными данными, опубликованными в работах других авторов и с данными, полученными в результате физического моделирования теплового поля коаксиального кабеля. Сопоставление аналитических и численных моделей показало полное совпадение результатов расчёта. Средние приведённые погрешности расчётов с помощью разработанных полевых моделей и математических алгоритмов не превышают 5% при соотнесении с экспериментальными данными.

7. Внедрение предлагаемых моделей и алгоритмов в качестве программного обеспечения для системы мониторинга температуры и пропускной способности высоковольтных КЛ будет полезно при реализации измерительных органов адаптивных защит линий электропередачи; решении задач ОМП; при реализации цифровой тепловой защиты высоковольтных КЛ с СПЭ

изоляция, которая будет не только отключать линию при возникновении превышения допустимой температуры, но и предсказывать возможность и время перегрева; для оценки степени теплового старения изоляции КЛ с учётом динамики фактической температуры жилы в режиме реального времени.

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

По перечню рецензируемых изданий ВАК

1. Лебедев, В.Д. Математическое моделирование электромагнитного поля коаксиального кабеля с двумя металлическими оболочками / В.Д. Лебедев, В.К. Слышалов, **Е.С. Зайцев** // Вестник ИГЭУ. – 2014. – Вып. 1. – С. 74–80.
2. Лебедев, В.Д. Расчет температуры жилы однофазного высоковольтного кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени / В.Д. Лебедев, **Е.С. Зайцев** // Вестник ИГЭУ. – 2015. – Вып. 4. – С. 11–16.
3. **Зайцев, Е.С.** Алгоритм оценки температур жил трёхфазных высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена / **Е.С. Зайцев**, В.Д. Лебедев // Электрические станции. – 2016. – Вып. 9. – С. 34–38.

По перечню изданий, индексируемых в базе данных SCOPUS

4. Lebedev, V.D. Research of High-Voltage Cable Installation's Operating Modes by Means of Program Comsol with Matlab / V.D. Lebedev, **E.S. Zaytsev** // Proceedings of International Conference on Computer Technologies in Physical and Engineering Applications (ICCTPEA). – Saint-Petersburg. – Russia. – IEEE. – 2014. – P. 95–96.
5. **Zaytsev, E.** Development of the Thermal Equivalent Circuit for Evaluating the Capacity of High Voltage Cables in Real Time / **E. Zaytsev**, V. Lebedev // Applied Mechanics and Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications, 2014. – Vol. 698. – P. 586–591.

Публикации в других изданиях

6. **Зайцев, Е.С.** Моделирование тепловых процессов в кабеле с изоляцией из сшитого полиэтилена средствами Matlab и Simulink / **Е.С. Зайцев**, В.В. Корольков, В.Д. Лебедев, В.В. Можжухина // Проектирование инженерных и научных приложений в среде MATLAB: материалы V междунар. науч. конф. – Харьков: НТУ «ХПИ», 2011. – С. 615–622.
7. **Зайцев, Е.С.** Расчет температурного поля в сечении высоковольтных линиях СО СПЭ изоляцией / **Е.С. Зайцев**, В.Д. Лебедев // Повышение эффективности энергетического оборудования: материалы VI междунар. науч.-практ. конф. – Иваново: ИГЭУ, 2011. – С. 500–504.
8. **Зайцев, Е.С.** Разработка программно-технического комплекса мониторинга и диагностики кабельных линий 110–220 кВ с изоляцией из сшитого полиэтилена / **Е.С. Зайцев** // Сборник материалов II ярославского энергетического форума. – Ярославль: 2011. – С. 209–211.
9. **Зайцев, Е.С.** Математические модели температурного поля высоковольтных кабелей с экструдированной (СПЭ) изоляцией / **Е.С. Зайцев**, В.В. Можжухина, В.Д. Лебедев // Вестник научно-промышленного общества. – М: «Алев-В», 2012. – Вып. 18. – С. 3–11.
10. **Зайцев, Е.С.** Математические модели переходных процессов в тепловом поле сечения высоковольтной кабельной линии с изоляцией из сшитого полиэтилена / **Е.С. Зайцев**, В.В. Можжухина // Электроэнергетика глазами молодежи: сборник статей III междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Екатеринбург: УрФУ, 2012. – Т. 1. – С. 232–237.
11. **Зайцев, Е.С.** Температурный мониторинг кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена для надёжного электроснабжения больших городов / **Е.С. Зайцев**, В.Д. Лебедев, В.А. Савельев, А.В. Гусенков // Методические вопросы исследования надёжности больших систем энергетики. Вып. 63. Проблемы надёжности систем энергетики в рыночных условиях. – Баку: АЗНИИПИИЭ, 2013. – С. 470–475.
12. **Зайцев, Е.С.** Система мониторинга пропускной способности высоковольтных кабелей с изоляцией из сшитого полиэтилена / **Е.С. Зайцев**, В.Д. Лебедев // Состояние и перспективы развития электротехнологии (XVII Бенардосовские чтения): материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т. 1. – С. 134–137.
13. **Зайцев, Е.С.** Расчёт электрических параметров многослойных цилиндрических объектов / **Е.С. Зайцев**, В.Д. Лебедев, В.К. Слышалов // Энергия 2013: материалы VIII междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2013. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 181–185.
14. Лебедев, В.Д. Учёт влияния поверхностного эффекта при определении пропускной способности высоковольтных кабельных линий в режиме реального времени / В.Д. Лебедев, **Е.С. Зайцев** // Электроэнергетика глазами молодежи: научные труды IV междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Новочеркасск: ЮРГПУ (НПИ), 2013. – Т. 1. – С. 503–507.

15. **Зайцев, Е.С.** Математическое моделирование электромагнитного поля коаксиального кабеля / **Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев** // Радиозлектроника, электротехника и энергетика: тезисы докладов XX междунар. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов: в 4 т. – М: НИУ «МЭИ», 2014. – Т. 4. – С. 354.
16. **Зайцев, Е.С.** Расчёт электрических параметров подводного бронированного кабеля методом конечных элементов / **Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев** // Энергия 2014: материалы IX междунар. науч. техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – Т. 3. – Ч. 1. – С. 171-175.
17. **Зайцев, Е.С.** Формирование граничных условий для расчёта электромагнитного поля коаксиального бронированного кабеля методом конечных элементов с учётом проводимости бесконечного грунта / **Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев** // Энергия 2014: материалы IX междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2014. – Т. 3. – Ч. 2. – С. 11-16.
18. Лебедев, В.Д. Моделирование режимов работы высоковольтных кабельных линий с помощью приложения «COMSOL WITH MATLAB» / В.Д. Лебедев, **Е.С. Зайцев** // Сборник материалов докладов Национального конгресса по энергетике: в 5 т. Казань: КГЭУ, 2014. – Т. 4. С. 296-303.
19. Лебедев, В.Д. Интеллектуальная система мониторинга пропускной способности и защиты от перегрева высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена / В.Д. Лебедев, **Е.С. Зайцев** // Релейная защита и автоматика энергосистем: сборник докладов XXII междунар. науч.-практ. конф. – М: 2014. – С. 292-298.
20. **Зайцев, Е.С.** Разработка тепловых схем замещения для оценки пропускной способности высоковольтных кабельных линий в режиме реального времени / **Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев** // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. научных трудов I междунар. науч. конф. молодых учёных. – Новосибирск: НГТУ, 2014. – Ч. 2. – С. 85-88.
21. **Зайцев, Е.С.** Расчёт параметров тепловой схемы замещения для прогнозирования нагрева кабелей в режиме реального времени / **Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев** // Энергия 2015: материалы X междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных: в 7 т. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 3. – С. 119-120.
22. **Зайцев, Е.С.** Разработка математической модели для прогнозирования нагрева жил высоковольтной кабельной линии / **Е.С. Зайцев, В.Д. Лебедев** // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологий (XVIII Бенардосовские чтения): материалы междунар. науч.-техн. конф.: в 4 т. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 3. – С. 467-471.
23. **Zaytsev, E.** Development of Calculation Methodology of Thermal Equivalent Circuit's Parameters for Predicting Temperature of High Voltage Cable Lines 110 – 500 kV (Разработка методики расчёта параметров тепловой схемы замещения для прогнозирования температуры высоковольтных кабельных линий 110 – 500 кВ) // Applied Mechanics and Materials. – Switzerland: Trans Tech Publications, 2015. – Vol. 792. – P. 272-279.
24. **Зайцев, Е.С.** Разработка методики расчёта параметров тепловой схемы замещения для прогнозирования температуры высоковольтных кабельных линий 110 – 500 кВ // Электротехника. Электротехнология. Энергетика: сборник научных трудов VII междунар. науч. конф. молодых ученых: в 3 ч. – Новосибирск: НГТУ, 2015. – Ч. 3. – С. 211-215.
25. Лебедев, В.Д. Алгоритм оценки температуры жилы однофазных высоковольтных кабелей с СПЭ изоляцией в режиме реального времени / В.Д. Лебедев, **Е.С. Зайцев** // Электроэнергетика глазами молодежи: труды VI междунар. науч.-техн. конф.: в 2 т. – Иваново: ИГЭУ, 2015. – Т. 1. – С. 95-100.

Результаты интеллектуальной деятельности

1. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015618278 «Программа для расчёта температурного профиля жилы однофазного коаксиального силового кабеля с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени». Авторы: Лебедев В.Д., Зайцев Е.С. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ: 05 августа 2015 года.
2. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2016616260 «Программа для расчёта температуры жил и оценки пропускной способности высоковольтных кабельных линий с изоляцией из сшитого полиэтилена в режиме реального времени». Авторы: Лебедев В.Д., Зайцев Е.С. Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ: 08 июня 2016 года.

Зайцев Евгений Сергеевич

РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ И АЛГОРИТМОВ СИСТЕМЫ МОНИТОРИНГА ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ КАБЕЛЬНЫХ ЛИНИЙ НАПРЯЖЕНИЕМ 110 – 500 кВ

Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук

Подписано в печать 28.12.2016 г. Формат 60х84 1/16.

Печать плоская. Усл. печ. л. 1,16. Тираж 100 экз. Заказ № 118.

ФГБОУ ВО «Ивановский государственный энергетический университет имени В.И. Ленина»
153003, г. Иваново, ул. Рабфаковская, д. 34. Отпечатано в УИУНЛ ИГЭУ.