

На правах рукописи



ПУХОВА Анастасия Игоревна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЛЭП
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ НАГРУЗОЧНОЙ
СПОСОБНОСТИ ПРОВОДА**

Специальность 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Хабаровск – 2025

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» (ДВГУПС).

Научный руководитель: **Игнатенко Иван Владимирович**, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», доцент кафедры «Системы электроснабжения».

Официальные оппоненты: **Смердин Александр Николаевич**, доктор технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Омский государственный университет путей сообщения», первый проректор, проректор по научной работе, заведующий кафедрой «Электроснабжение железнодорожного транспорта».

Ковалев Алексей Александрович, кандидат технических наук, доцент, федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения», заведующий кафедрой «Электроснабжение транспорта».

Ведущая организация: федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Приволжский государственный университет путей сообщения».

Защита состоится « 02 » июля 2025 г. в 15 час. 00 мин. на заседании объединённого диссертационного совета 99.2.140.02 при ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» и ФГБОУ ВО «Дальневосточный государственный университет путей сообщения» по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, корпус 3, аудитория 201/3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «КНАГУ» и на официальном сайте https://sovnet.knastu.ru/diss_defense.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенные печатью, просим направлять по адресу: 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ФГБОУ ВО «КНАГУ», учёному секретарю диссертационного совета 99.2.140.02 (e-mail: erapu@knastu.ru).

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Учёный секретарь диссертационного совета
99.2.140.02, канд. техн. наук, доцент



А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность избранной темы

Задачи и приоритеты развития энергетики определяются в Энергетической стратегии, утверждённой Правительством РФ. В 2020 г. была принята очередная Энергетическая стратегия России на период до 2035 года. В документе указано, что повышение энергетической эффективности является одним из основных приоритетов развития энергетики. Для электросетевых систем ключевым показателем эффективности работы служит пропускная способность электрических сетей. Пропускная способность – это максимальное значение мощности, которую можно передать, не превышая режимно-технических ограничений.

В приказах Министерства энергетики Российской Федерации № 340 от 23.07.2012 и № 102 от 13.02.2019 определено, что собственники оборудования должны предоставлять в диспетчерские центры Системного оператора информацию об аварийно-допустимых токовых нагрузках (АДТН) для основного оборудования, в том числе для воздушных (ВЛ) и кабельных линий длительностью до 10 с, 1 и 20 мин. Методики Минэнерго России для расчета всех необходимых значений тока в зависимости от времени в настоящее время отсутствуют, а существующие определяют только длительные токи (до 20 мин), что не позволяет получить значения допустимой перегрузки проводов для меньших интервалов времени. Для решения данной проблемы необходимо сформировать математическую модель, которая позволит определять допустимые токи в заданных эксплуатационных условиях, т.е. при текущих значениях температуры воздуха и режиме работы электрической сети, оперативно и точно.

Степень разработанности темы исследования

В первой половине XX века были заложены основы современной теории и практики расчёта температурных режимов линий электропередач и действующих правил по определению максимальных токовых нагрузок проводов ЛЭП. С развитием техники заложенные идеи расчётов расширялись и модернизировались. Вклад в развитие теории расчёта температуры проводов внесли следующие отечественные и зарубежные авторы: Ахмедова О.О., Бигун А.Я., Воротницкий В.Э., Вырва, А.А., Герасименко А.А., Гиршин С.С., Григорьев В.Л., Игнатьев В.В., Железко Ю.С., Жарков Ю.И., Зарудский Г.К., Засыпкин, А.С., Левченко И.И., Махлин Б.Ю., Никифоров Е.П., Петрова Т.Е., Сацук Е.И., Соловьев В.А., Сыромятников С.Ю., Тимашова Л.В., Фигурнов Е.П., Шкапцов В.А., Cardenas J., Du Y., Goran A., Krontiris T., Lovrencic V., Qemali, M., Teh J., Wasserrab A., Zima M. и многие другие. Современные методы позволяют более точно определить температуру проводов ВЛЭП, их активное сопротивление и стрелу провеса, а также учесть различные природные

факторы, которые ранее не учитывались в виду отсутствия вычислительных мощностей и достаточных исходных данных.

Цель исследования – повышение эффективности работы ЛЭП за счёт создания комплексной модели нагрузочной способности провода с учётом времени действия токовых нагрузок, климатических условий по критериям сохранения механической прочности и допустимого габарита.

Задачи исследования

1. Провести анализ влияния изменения условий эксплуатации и развития электроэнергетики на тепловые процессы в проводах ЛЭП.

2. Составить комплексную математическую модель тепловых процессов в проводе, которая будет определять критические токовые нагрузки воздушных ЛЭП разной длительности с учетом климатических факторов.

3. Разработать испытательный стенд тепловых процессов в проводе с автоматизированным контролем температуры окружающего воздуха, температуры провода и задаваемого тока.

4. Провести экспериментальные исследования динамики тепловых процессов в различных режимах эксплуатации проводов ЛЭП разных марок с целью проверки адекватности полученной математической модели.

5. Разработать программный продукт для автоматизации расчетов, который позволит рассчитывать режимы работы сети при различных условиях эксплуатации.

Объект исследования – провода воздушных линий электропередачи электроэнергетических систем в различных режимах токового воздействия электрической сети.

Предмет исследования – математическая модель тепловых процессов в проводах ЛЭП в различных нестационарных режимах работы сети с учётом климатических условий окружающей среды.

Научная новизна

1. Разработан комплексный аналитический метод решения дифференциального уравнения теплового баланса нестационарного теплового режима для неизолированных проводов, который позволяет одновременно оценить механическую прочность провода и изменение стрелы провеса в габарите ЛЭП.

2. Разработана комплексная модель расчёта температуры проводов с определением критических токовых нагрузок воздушных линий электропередачи разной длительности с учетом климатических факторов, позволяющая повысить пропускную способность линий электропередачи.

3. Разработан алгоритм расчёта допустимой токовой нагрузки с учётом механической прочности провода и допустимого габарита, позволяющий оценить величину критической токовой нагрузки и повысить эффективность работы ЛЭП.

Теоретическая и практическая значимость

1. Создан испытательный стенд для изучения тепловых процессов в проводе с автоматизированным контролем температуры окружающего воздуха, температуры провода и задаваемого тока, с обработкой, синхронизацией и цифровизацией аналоговых сигналов с датчиков, позволяющий повысить точность результатов экспериментов, влияющих на достоверность параметров математической модели.

2. Разработан программный продукт для автоматизации расчетов, позволяющий оценить различные режимы работы электрической сети при различных условиях эксплуатации.

3. Создана база данных критических токовых значений проводов воздушных линий электропередачи, позволяющая владельцам электрических сетей передавать значения длительно допустимых и аварийно-допустимых нагрузок для эксплуатируемых объектов.

Методология и методы исследования

При выполнении работы использовались: теория теплопередачи, элементы теории электрических цепей, численные методы решения дифференциальных уравнений. Моделирование тепловых процессов в проводе проводилось на экспериментальном стенде. Математическое моделирование проводилось в программных комплексах Mathcad.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Разработанная математическая модель расчёта температуры проводов с определением критических токовых нагрузок воздушных линий электропередачи разной длительности с учетом климатических факторов.

2. Созданный испытательный стенд для изучения тепловых процессов в проводе с автоматизированным контролем температуры окружающего воздуха, температуры провода и задаваемого тока.

3. Разработанный алгоритм расчёта допустимой токовой нагрузки с учётом механической прочности провода и допустимого габарита.

Достоверность научных исследований и результатов работы обоснована практически. Адекватность полученных результатов подтверждается корректным применением апробированных вычислительных методов, сбором и обработкой экспериментальных данных, использованием сертифицированного измерительного оборудования. Расхождение результатов, полученных на экспериментальном стенде и математической модели, не превышают 5%.

Личный вклад соискателя. Соискателю принадлежат: разработка математических моделей, анализ результатов, программная реализация алгоритмов, проверка достоверности исследований. Научные и практические результаты, выносимые на защиту, разработаны и получены автором.

Реализация результатов работы. Работа проводилась в рамках НИР «Разработка методики для определения аварийно-допустимых токов для ВЛ 110 кВ» 2021 г. Полученный программный продукт по расчёту допустимых токовых нагрузок применяют в АО «Дальневосточная распределительная сетевая компания» входящую в группу ПАО «РусГидро». Также данные исследования применялись в НИР по государственному заданию «Создание адаптивной модели и способа контроля текущей и перспективной нагрузочной способности проводов и тросов систем тягового электроснабжения» 2023 г. Результаты проведённых исследований применяются в научно-исследовательской работе и учебном процессе Дальневосточного государственного университета путей сообщения (ДВГУПС).

Апробация работы. III Международный научно-образовательный форум «Хэйлунцзян-Приамурье» (Биробиджан, 2019). Конкурс студенческих научных работ в области инноваций и технического творчества научно-исследовательской программы XXV (Юбилейного) Хабаровского краевого открытого фестиваля «Студенческая весна-2019» (Хабаровск, 2019). Молодёжный конкурс инновационных проектов (Хабаровск, 2019). Всероссийская научно-практическая конференция творческой молодёжи с международным участием «Научно-техническое и социально-экономическое развитие транспорта и промышленности стран АТР» (Хабаровск, 2022); XXV Краевого конкурса молодых ученых и аспирантов (Хабаровск 2023); «Производственные технологии будущего: от создания к внедрению» (КНАГУ, Комсомольск-на-Амуре).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 15 печатных работ, из них 6 статей в изданиях, рекомендованных ВАК Российской Федерации.

Соответствие паспорту специальности

Содержание диссертации соответствует следующим областям исследования паспорта специальности 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы: п. 1. Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, анализ системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем, включая электромеханические, электромагнитные преобразователи энергии и электрические аппараты, системы электропривода, электроснабжения и электрооборудования; п. 2. Разработка научных основ проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов, систем и их компонентов; п. 3. Разработка, структурный и параметрический синтез, оптимизация электротехнических комплексов, систем и их компонентов, разработка алгоритмов эффективного управления; п. 4. Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов, систем и их компонентов

в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях, диагностика электротехнических комплексов.

Структура и объем диссертации. Работа включает введение, четыре главы, заключение, список литературы из 121 наименования, три приложения. Текст диссертационной работы изложен на 169 страницах печатного текста, включает 13 таблиц, 30 рисунков.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснованы актуальность, значимость выбранной темы ВКР, её научное и практическое значение, сформулированы цель и задачи исследований и основные научные положения, выносимые на защиту.

В главе 1 проведен анализ влияния развития электроэнергетической отрасли в условиях изменения внешних факторов эксплуатации сети на тепловые процессы в проводах ЛЭП. Наблюдается тенденция увеличения потребления электроэнергии как в мировом масштабе, так и в пределах России, что приведет к необходимости строительства новой генерации и сетей. Однако строительство генерации и сетей сопряжено с рядом трудностей и не всегда поспевает за темпами роста электропотребления.

Другим важным фактором, на который следует обратить внимание, является то, что сети и генерация в большинстве своём имеют длительный срок эксплуатации, что вызывает необходимость плановых ремонтов. Во время одного из таких ремонтов произошла авария, в результате которой потребители на Дальнем Востоке недополучили 1,2 МВт электроэнергии.

Вследствие этой и подобных аварий, а также ввиду необходимости увеличения пропускной способности и надёжности работы оборудования Минэнерго России издало Приказ от 13 февраля 2019 г. № 102 «Об утверждении правил предоставления информации, необходимой для осуществления оперативно-диспетчерского управления в электроэнергетике».

На данный момент существует необходимость разработки адаптивной методики расчёта допустимой токовой нагрузки с учётом широкого спектра факторов. Требования в нормативных документах не соответствуют современным условиям в части эффективной и безопасной передачи электроэнергии. Допустимая токовая нагрузка напрямую зависит от температуры провода, поэтому рассмотрены существующие методики определения температуры провода.

В научных исследованиях представлены различные подходы к измерению температуры провода в эксплуатируемой линии электропередачи. Наиболее надёжным из них считается мониторинг температуры провода с помощью установки приборов для дистанционного контроля температуры.

Однако широкое применение систем мониторинга температуры провода в России на данный момент невозможно по ряду причин: для внедрения нужны значительные инвестиции как для закупки, так и для монтажа с дальнейшим техническим обслуживанием; из-за сложного климата и больших протяженностей линий необходимо большое количество датчиков для корректного определения температуры по всей длине линии; в малонаселённых местах датчики устанавливать невозможно в виду отсутствия сотовой связи, которая нужна для передачи данных с устройств в диспетчерские центры.

Помимо прямого определения температуры провода с помощью различного рода датчиков, существуют косвенные методы определения температуры провода, основанные на основе решений математических уравнений, учитывающих условия окружающей среды.

Путем сбора статистических данных в различных условиях и их аппроксимации можно подобрать функцию, которая коррелирует с экспериментальными данными. Однако эмпирические методы определения температуры провода не всегда обеспечивают удовлетворительные результаты для разных типов проводов, условий местности и метеорологических данных.

Другим методом нахождения температуры проводов ВЛ является решение уравнения теплового баланса, которому отдается предпочтение в данной работе, так как он обеспечивает хорошую точность, при этом не требуя сложных технических решений.

В главе 2 разработана математическая модель расчёта температуры для проводов с определением критических токовых нагрузок воздушных линий электропередачи разной длительности с учетом климатических факторов. Рассмотрены тепловые процессы в воздушной сети электроснабжения, которые обусловлены, с одной стороны, нагревом из-за тока, протекающего по проводам сети, с другой – теплообменом с окружающей средой. При этом часть энергии тратится на повышение температуры провода. Уравнение тепловых процессов в проводе имеет вид:

$$q_{\text{нагр}} = q_{\text{тепл.ист}} - q_{\text{охл}} + q_{\text{с.изл}}, \quad (1)$$

где $q_{\text{нагр}}$ – количество теплоты, идущее на повышение температуры провода; $q_{\text{тепл.ист}}$ – количество теплоты, выделяющееся из-за активного сопротивления; $q_{\text{охл}}$ – количество теплоты, отводимое в окружающее пространство;

Тепловой поток $q_{\text{нагр}}$, вызывающий увеличение температуры провода, учитывая его массу, теплоёмкость, материал, а также то, что удельная теплоёмкость материала провода линейно зависит от температуры провода, имеет вид:

$$q_{\text{нагр}} = \left(\left(1 + \beta_a \cdot (\theta(t) + T_{\text{окр}}) \right) \cdot c_a \cdot m_a + \left(1 + \beta_c \cdot (\theta(t) + T_{\text{окр}}) \right) \cdot c_c \cdot m_c \right) \cdot \frac{d\theta}{dt}, \quad (2)$$

где β_a – температурный коэффициент теплоемкости алюминия, $1/^\circ\text{C}$; β_c – температурный коэффициент теплоемкости стали, $1/^\circ\text{C}$; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающего воздуха; c_a – удельная теплоемкость алюминия при 0°C ; c_c – удельная теплоёмкость алюминия при 0°C ; m_a – масса алюминиевой части, кг; m_c – масса стальной части, кг; θ – разница между температурой провода и окружающего воздуха, $^\circ\text{C}$; t – время протекания тока, с.

Следующая составляющая уравнения теплового баланса – уравнения нагрева провода. Оно состоит из двух частей: нагрева от действия протекающего тока и нагрева от солнечного излучения.

С учётом нелинейной зависимости сопротивления от температуры проводника, а также поверхностного эффекта и магнитных потерь уравнение нагрева от тока имеет вид:

$$q_{\text{тепл.ист}} = k_{\text{п}} \cdot k_{\text{м}} \cdot I^2 \cdot R_{20} \cdot (1 + \alpha \cdot (T_{\text{окр}} + \theta - 20)), \quad (3)$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент, учитывающий поверхностный эффект; $k_{\text{м}}$ – коэффициент, учитывающий магнитные потери в стали; R_{20} – сопротивление провода при температуре 20°C , Ом; α – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления проводника от изменения температуры, $1/^\circ\text{C}$.

Количество теплоты от солнечной радиации, поглощаемое 1 м провода, определяется уравнением:

$$q_{\text{с.изл}} = W_{\text{р}} \cdot d_{\text{пр}} \cdot \epsilon_{\text{п}}, \quad (4)$$

где $W_{\text{р}}$ – интегральная поверхностная плотность потока энергии солнечного излучения; $d_{\text{пр}}$ – диаметр провода, м; $\epsilon_{\text{п}}$ – коэффициент поглощения солнечного излучения.

Последняя составляющая уравнения – охлаждение провода. Оно состоит из двух составляющих излучения и конвекции. Формула для количества теплоты, переносимого от провода в окружающую среду с помощью излучения, записывается в следующем виде:

$$q_{\text{изл}} = \sigma \cdot \epsilon \cdot P \cdot ((T + 273)^4 - (T_{\text{окр}} + 273)^4), \quad (5)$$

где $\sigma = 5,6697 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$ – константа, называемая постоянной Стефана–Больцмана; T – температура провода, К; $T_{\text{окр}}$ – температура окружающей среды,

K ; ε – коэффициент излучения (степень черноты) для реальных тел; S – площадь излучающей поверхности, m^2 .

Для горизонтального провода при скорости воздушного потока $0,6$ м/с удельный конвективный тепловой поток (количество тепла, передаваемое конвекцией с 1 m^2 поверхности провода за секунду в неограниченную среду) может быть выражен следующим приближенным уравнением:

$$q_{\text{конв}} = 2,5 \cdot \theta^{1,25} \cdot \left(\frac{293}{T+273} \right)^{0,25}. \quad (6)$$

Суммарный удельный тепловой поток, отдаваемый нагретым проводом в окружающую среду конвекцией и тепловым излучением с одного m^2 , равен:

$$q'_{\Sigma} = 2,5 \cdot \theta^{1,25} \cdot \left(\frac{293}{T+273} \right)^{0,25} + \sigma \cdot \varepsilon \cdot ((T+273)^4 - (T_{\text{окр}}+273)^4). \quad (7)$$

В логарифмических координатах ($\ln \theta$, $\ln$) график функции представляет собой кривую, которая хорошо аппроксимируется прямой, заданной уравнением:

$$\ln q'_{\Sigma} = h \cdot \ln \theta + \omega, \quad (8)$$

где h – угловой коэффициент прямой; ω – коэффициент, зависящий от температуры окружающей среды.

Поэтому суммарный тепловой поток можно выразить в виде

$$q_{\text{охл}} = q'_{\Sigma} \cdot P = \omega \cdot P \cdot \theta^h. \quad (9)$$

Финальное уравнение теплового баланса примет вид:

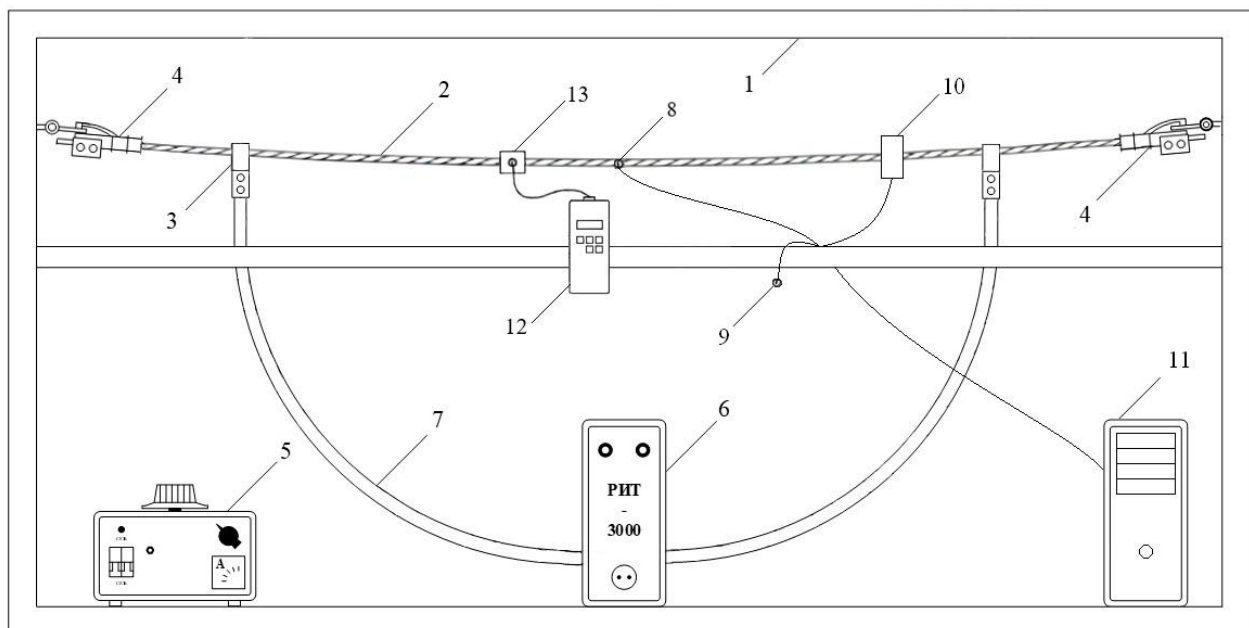
$$\begin{aligned} & \left(\left(1 + \beta_a \cdot (\theta(t) + T_{\text{окр}}) \right) \cdot c_a \cdot m_a + \left(1 + \beta_c \cdot (\theta(t) + T_{\text{окр}}) \right) \cdot c_c \cdot m_c \right) \cdot \frac{d\theta}{dt} = \\ & = k_{\text{п}} \cdot k_{\text{м}} \cdot I^2 \cdot R_{20} \cdot \left(1 + \alpha \cdot (T_{\text{окр}} + \theta - 20) \right) - \omega \cdot P \cdot \theta^h + W_p \cdot d_{\text{пр}} \cdot \varepsilon_{\text{п}}. \end{aligned} \quad (10)$$

Уравнение (10) описывает изменение превышения температуры провода над температурой окружающей среды, обусловленное протекающим по нему током.

В главе 3 рассмотрено определение параметров уравнения теплового баланса с помощью экспериментального нагрева провода.

Для определения коэффициентов уравнения охлаждения провода, необходимо провести натурные опыты нагрева и охлаждения провода, для этого был создан экспериментальный стенд.

Эксперимент проводился на специально сконструированном стенде, изображённом на рисунке 1.



- 1 – металлическая рама; 2 – исследуемый провод; 3 – соединительные зажимы;
 4 – натяжные зажимы; 5 – регулировочный трансформатор; 6 – трансформатор питания;
 7 – шлейф параллельного провода; 8, 9 – датчики температуры; 10 – датчик тока;
 11 – компьютер; 12 – термометр; 13 – поверхностный зонд

Рисунок 1 – Испытательный стенд для измерения пропускной способности провода

Электрическая схема стенда представляет собой замкнутый контур, по которому пропускают необходимую величину тока. Чтобы создать ток в контуре, используется источник тока РИТ-3000, который состоит из регулировочного трансформатора и трансформатора питания. Трансформатор питания индуцирует ток в замкнутом контуре величиной до 3600 А, что позволяет нагревать испытываемый образец до температуры более 300 °С. Для плавного регулирования тока в схеме применяется регулировочный трансформатор (с изменением числа витков), который включается в сеть 220 В. Контроль напряжения ведется двумя вольтметрами (до 300 В) на первичной и вторичной обмотках трансформатора, контроль тока в контуре осуществляется при помощи датчика тока.

Для определения сопротивления провода используется микроомметр марки Sonel MMR-630. Сопротивление провода измеряется при разомкнутом контуре. Для максимальной точности измерение проводится не менее трех раз, после чего берется усредненное значение полученных сопротивлений. Температура провода и окружающего воздуха фиксируется при помощи датчиков температуры, для контроля точности измерения температуры провода применялся термометр контактный ТК-5.05. Для производства

автоматизированного процесса контроля температурных и токовых параметров исследуемых проводов ЛЭП на стенде был составлен алгоритм работы программы в программном пакете National Instruments LabVIEW 19.0.

Реализованная программа позволяет автоматизировать процесс контроля измеряемых параметров, а также производить автоматическую запись результатов. Применяемые датчики и средства сбора/обработки данных были прокалиброваны в соответствии с другими средствами измерений и показали сходимость: для средств измерений тока $\pm 0,1\%$, для средств измерения температуры $\pm 0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$.

При проведении опытов были использованы сталеалюминевые провода различных размеров: от АС 70/11 до АС500/336. Все они были демонтированы с ЛЭП, т. е. это провода, которые были в эксплуатации. Это важный момент, так как это позволит создать более реалистичную модель. Провода имели несущественный износ.

Эксперименты на стенде проводились в два этапа. На первом этапе производились замеры при подаче тока на провод с помощью устройства РИТ-3000. Ток подавался до тех пор, пока температура провода перестанет существенно возрастать, т. е., когда прирост составлял менее одного градуса за пять минут. После чего подача тока прекращалась. Второй этап – это замер динамики охлаждения нагретого провода. Без источника нагрева, т. е. при отсутствии тока, температура провода постепенно снижалась. Измерения проводили пока температура провода не станет примерно равна температуре окружающего воздуха.

Уровень тока задавался различным: от 100 до 1000 А, в зависимости от диаметра провода. Для каждого образца провода проводилось по четыре опыта. Эксперименты различались величиной протекающего тока. Задача заключалась в том, чтобы нагреть провод до различных установившихся температур, т.е. до температуры, выше которой провод не нагреется при заданной силе тока. Как правило, температура варьировалась от 35 до 90 $^{\circ}\text{C}$. Данное условие позволило получить семейства зависимостей для каждого провода, что в свою очередь повысит точность выбора коэффициентов. Стоит также отметить, что с ростом температуры увеличивается сопротивление, что влечёт за собой снижение тока. Во время проведения опытов уровень тока оставался неизменным благодаря постоянной ручной корректировке значения тока с помощью регулировочного трансформатора.

Для определения коэффициентов уравнения в программе Mathcad была создана расчётная модель, её суть заключается в одновременном расчёте нескольких вариаций исходных данных. Данные задаются в соответствии с проведёнными опытами. Также в Mathcad заносятся полученные в опытах данные. При сравнении расчётных данных с экспериментальными корректируется коэффициент теплоотдачи.

В результате многочисленных расчётов были получены следующие значения коэффициентов: показатель степени $h = 1,22$ для всех проводов; коэффициент f варьируется в пределах 6–4,5, в зависимости от марки провода.

Далее на рисунке 2 приведены графики расчётных и экспериментальных данных для провода АС 70/11.

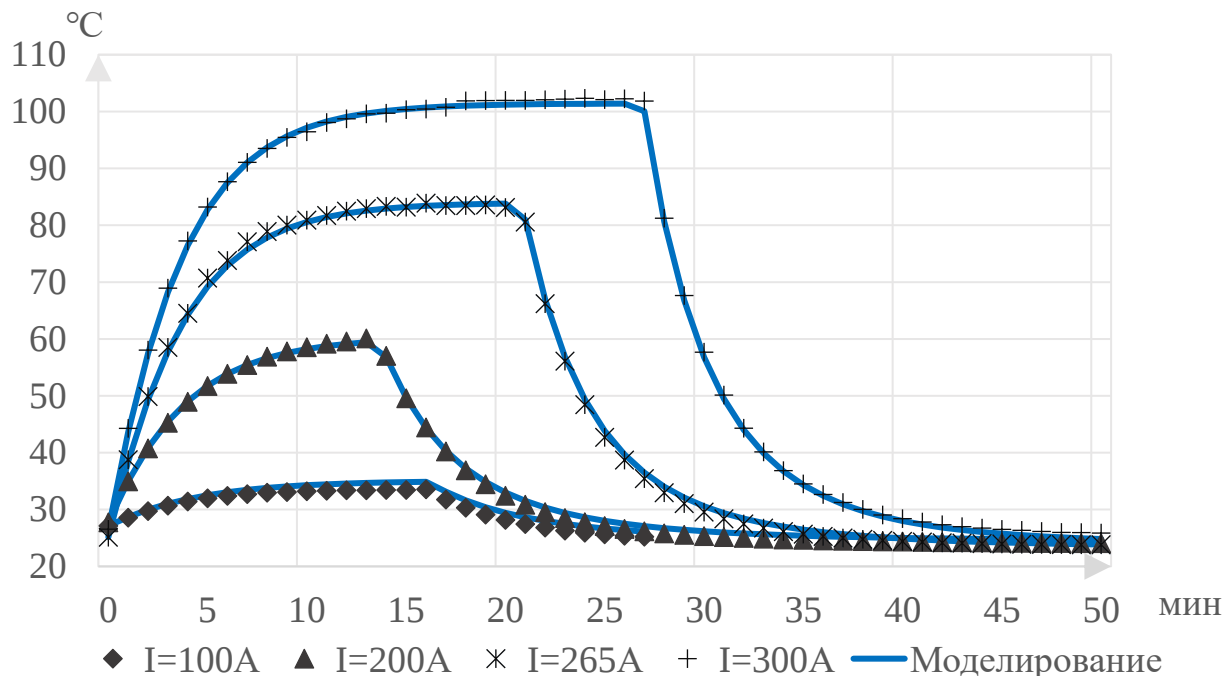


Рисунок 2 – Расчётные и опытные значения тепловых процессов в проводе АС 70/11 для различных токов

Результаты эксперимента, а также кривые математической модели при моделировании эксплуатационных режимов работы представлены на рисунке 2.

Расхождение опытных и математических данных не превышает 5 %.

В главе 4 приведена разработка алгоритма расчёта допустимых токовых нагрузок проводов ЛЭП. Для того чтобы найти зависимость возрастания температуры от провода, необходимо решить нелинейное дифференциальное уравнение первого порядка.

Решение производится численным методом с помощью программного комплекса Mathcad.

В начале расчёта вносятся исходные данные о проводе (рисунок 3), пролёте и условиях окружающей среды. Далее вычисляется, при какой максимальной температуре не будет превышен допустимый габарит провода (рисунок 4).

Исходные данные

кп := 1.05	Токр := 25	g := 0.003
км := 1.04	s := 0	h := 1.22
ma := 0.814	T0 := 0	Ca := 886
mc := 0.301	l := 100	Cc := 437
ппров := 15		βa := 0.000534
dnp := 24 · 10 ⁻³	ha := 13	βc := 0.001076
dпов := 4 · 10 ⁻³	hb := 12	Тн := Токр
R20 := 0.0958 · 10 ⁻³	hп := 3	εп := 0.6
αс := 0.00403	x1 := 50	Wp := 1125
αу := 19.8 × 10 ⁻⁶	lab := 4	
γ := 3.7 · 10 ⁻³	h1a := 2	tn1 := 10
E := 7.7 · 10 ³	hd := 5	
	σн := 8	
	f1 := 2.875	

Рисунок 3 – Часть программного кода:
исходные данные для провода марки АС 300/39

Расчёт габарита

hab := ha - hb + lab = 5

a := 0,1..40 Тд(a) := 90 - a

$$f(\sigma_p) := \sigma_p - \frac{\gamma^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_p^2} - \left[\sigma_n - \frac{\gamma^2 \cdot l^2 \cdot E}{24 \cdot \sigma_n^2} - \alpha_y \cdot E \cdot (T_d(0) - T_0) \right] \quad \sigma_p := \text{root}(f(\sigma_p), \sigma_p, 1, 100) = 2.252$$

$$f_m := \frac{\gamma \cdot l^2}{8 \cdot \sigma_p} = 2.054 \quad y1 := \frac{4 \cdot f_m \cdot x1 \cdot \left(1 - \frac{x1}{l}\right)}{1} = 2.054 \quad f_n := \text{if}(h_n > 0, y1 + h1a, f_m + 0.5 \cdot lab) = 4.054$$

Рисунок 4 – Часть программного кода: начало цикла вычисления допустимой температуры
из допустимого габарита

В уравнение состояния провода поочерёдно подставляется сначала максимально допустимая температура для сталеалюминевых проводов – 90 °С, затем на градус меньше и т.д.

На рисунке 5 представлен конец цикла, в котором все полученные значения габарита для разных температур сравниваются с допустимым значением по ПУЭ. Сравнение начинается с габарита для большей температуры: если он не превысил допустимый габарит, то для дальнейшего решения будет использовано максимальное значение, т.е. 90 °С.

```

i1 := | i ← 0
      | while i < 41
      |   | i ← i + 1
      |   | (break) if hn_i > hd
      | Тд(i - 1)
      | i1 = 90

```

Рисунок 5 – Часть программного кода: конец цикла вычисления
допустимой температуры из допустимого габарита

Если габарит превысит допустимый, то проверяется следующее число и так далее, пока условие не будет выполнено. Соответственно для дальнейшего решения будет использована температура, при которой габарит не превысил допустимый. Этот расчёт необходим из-за того, что в некоторых пролётах лимитирующим показателем является не термическая прочность провода, а допустимый габарит. Например, если под линией проходит другая линия или же какое-либо строение.

```

a := 0.1...20  Iv1(a) := a · 1000
Given  $\left[1 + \beta_a \cdot (\theta_1(t) + T_{окр})\right] \cdot C_a \cdot m_a + \left[1 + \beta_c \cdot (\theta_1(t) + T_{окр})\right] \cdot C_c \cdot m_c \cdot \theta_1'(t) \cdot 1.1 = km \cdot kn \cdot (Iy1(0))^2 \cdot R20 \cdot [1 + \alpha_c \cdot (T_{окр} + \theta_1(t) - 20)] - \omega \cdot P \cdot \theta_1(t)^h + s \cdot \varepsilon n \cdot dэ \cdot Wp$ 
 $\theta_1(0) = T_n - T_{окр}$   $\theta_1 := \text{Odesolve}(t, 18000)$   $T(t) := \theta_1(t) + T_{окр}$   $t_0 := T(tn1) = 25$ 

Given  $\left[1 + \beta_a \cdot (\theta_1(t) + T_{окр})\right] \cdot C_a \cdot m_a + \left[1 + \beta_c \cdot (\theta_1(t) + T_{окр})\right] \cdot C_c \cdot m_c \cdot \theta_1'(t) \cdot 1.1 = km \cdot kn \cdot (Iy1(1))^2 \cdot R20 \cdot [1 + \alpha_c \cdot (T_{окр} + \theta_1(t) - 20)] - \omega \cdot P \cdot \theta_1(t)^h + s \cdot \varepsilon n \cdot dэ \cdot Wp$ 
 $\theta_1(0) = T_n - T_{окр}$   $\theta_1 := \text{Odesolve}(t, 18000)$   $T(t) := \theta_1(t) + T_{окр}$   $t_1 := T(tn1) = 26.121$ 

Given  $\left[1 + \beta_a \cdot (\theta_1(t) + T_{окр})\right] \cdot C_a \cdot m_a + \left[1 + \beta_c \cdot (\theta_1(t) + T_{окр})\right] \cdot C_c \cdot m_c \cdot \theta_1'(t) \cdot 1.1 = km \cdot kn \cdot (Iy1(2))^2 \cdot R20 \cdot [1 + \alpha_c \cdot (T_{окр} + \theta_1(t) - 20)] - \omega \cdot P \cdot \theta_1(t)^h + s \cdot \varepsilon n \cdot dэ \cdot Wp$ 
 $\theta_1(0) = T_n - T_{окр}$   $\theta_1 := \text{Odesolve}(t, 18000)$   $T(t) := \theta_1(t) + T_{окр}$   $t_2 := T(tn1) = 29.513$ 

```

Рисунок 6 – Часть программного кода: начало цикла вычисления допустимого тока

На рисунке 6 показано начало цикла вычисления допустимого тока. Как и в вычислении температуры, происходит вычисление для разных значений. В уравнение теплового баланса подставляется ток различной величины. Вычисляется температура, сравнивается с полученным ранее значением: правильным будет то, которое максимально близко к нему, но не превышает. Из-за особенностей работы Mathcad необходимо было для каждой величины тока расписать решение. Чтобы этого избежать было сделано несколько циклов. В первом находилось значение кратное тысяче, далее к полученному значению перебором прибавляются сотни, находится значение, ближайшее к допустимой температуре. И далее также происходит с десятками и единицами.

На рисунке 7 изображен конец цикла вычисления допустимого тока, перебор значений не кратных 10 и вывод конечного ответа, т. е. тока, при котором значение максимальной температуры в заданный период будет максимально близко, но не превышать допустимую температуру, в нашем случае 90 °С.

```

i4 :=  $\left| \begin{array}{l} i \leftarrow 0 \\ \text{while } i < 11 \\ \quad \left| \begin{array}{l} i \leftarrow i + 1 \\ (break) \text{ if } t_i > T_d \end{array} \right. \\ \quad (i - 1) \end{array} \right.$  i4 = 8

Id1 := i1 + i2 + i3 + i4 =  $7.188 \times 10^3$ 

```

Рисунок 7 – Часть программного кода:
конец цикла вычисления допустимого тока

Данный алгоритм можно представить в виде блок-схемы, изображенной на рисунке 8.

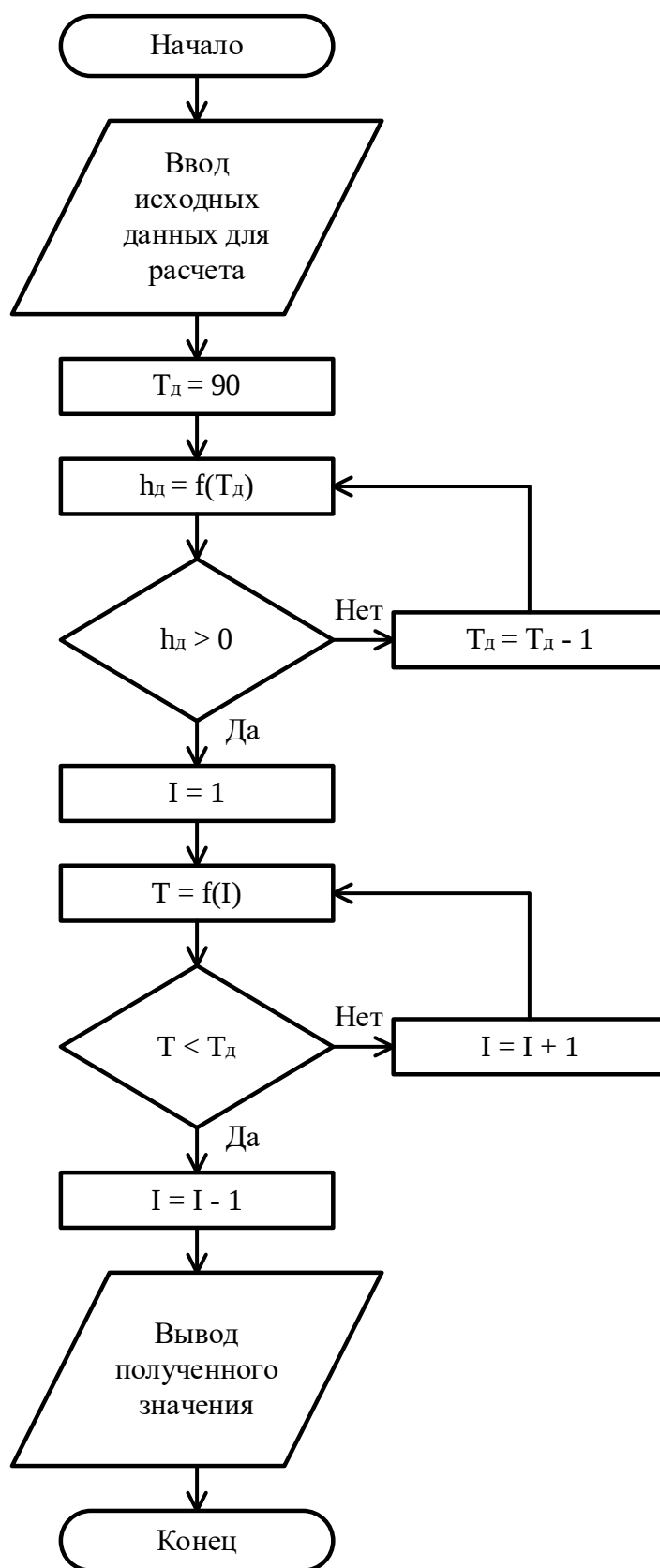


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма расчёта допустимых токовых нагрузок проводов ЛЭП

Однако потенциал данной модели не ограничивается расчётом допустимых токовых нагрузок. Её можно модифицировать под решение разных задач. Например, определение температуры провода в текущем режиме работы ЛЭП.

Итерационно решая уравнение теплового баланса, подставляя текущие токовые значения, можно определять текущую температуру провода, что позволит определять текущий уровень активных потерь в проводе и максимально точно подбирать аварийно допустимый ток.

Ещё один вариант – это использование математической модели в связке с измерительными датчиками на линии. Во-первых, такой вариант поможет снизить количество применяемых устройств, во-вторых, благодаря сравнению расчётной температуры, при наихудших условиях и измеренной температуре можно будет определить дополнительное охлаждение ветром, что повысит точность расчёта АДТН в текущий момент времени.

Для удобства работы данный алгоритм был перенесён в программный продукт платформы 1С: Предприятие. Внешний вид полученной программы изображен на рисунке 9.

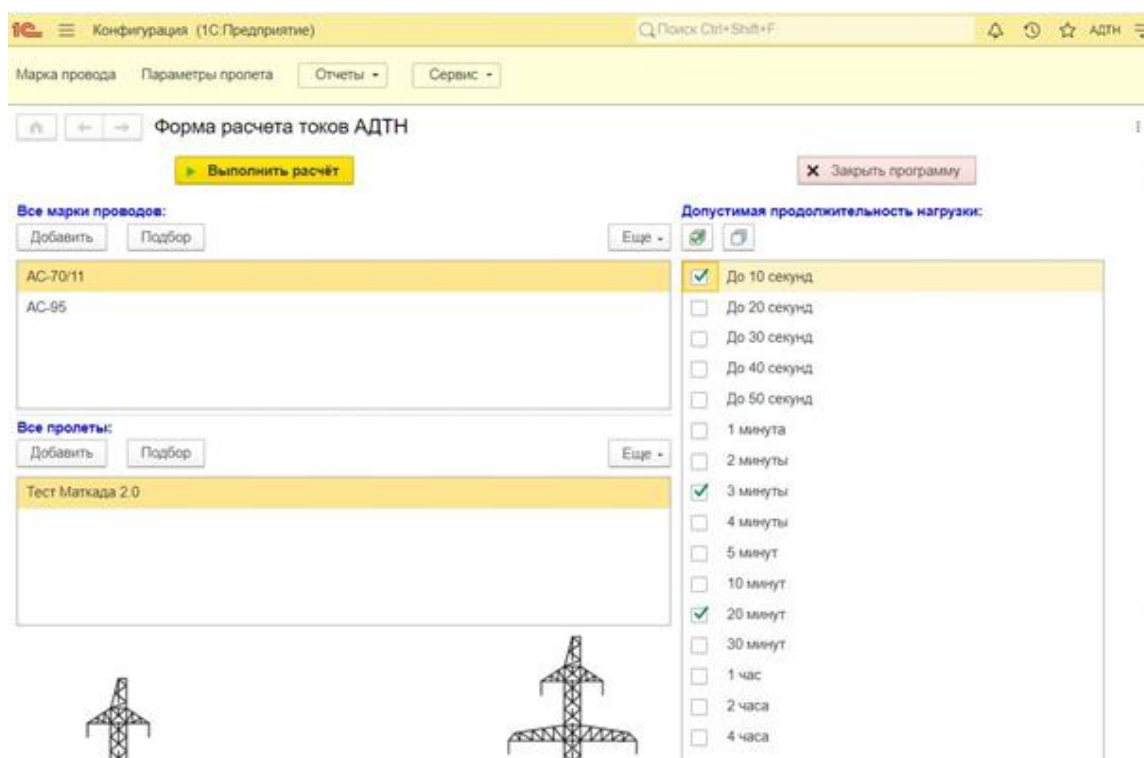


Рисунок 9 – Внешний вид программы 1С: Предприятие

Проведено технико-экономическое обоснование внедрения результатов диссертационного исследования. Предполагается, что внедрение программно-аппаратного комплекса АДТН необходимо в каждом филиале АО «ДРСК» для оперативного принятия решений и реагирования на аварийные ситуации.

В результате внедрения программно-аппаратного комплекса АДТН в филиале АО «ДРСК» «Хабаровские электрические сети» экономический эффект составит 1285,57 тыс. руб. в год.

Дальнейшей перспективой использования и получения максимальной экономической эффективности можно достичь за счет масштабирования программно-аппаратного комплекса АДТН на различных электросетевых предприятиях, а также создаваемых территориально-сетевых организациях, производящих обслуживание линий в каждом регионе страны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблемы повышения эффективности работы ЛЭП с помощью научно обоснованных технических решений повышения пропускной способности ЛЭП, разработанных на основе комплексной модели нагрузочной способности провода, представляющее важное теоретическое и практическое значение и являющееся определенным вкладом в развитие энергетической области.

Основные научные и практические результаты, полученные и обобщенные в диссертации, состоят в следующем.

1. В Дальневосточной энергосистеме сложился устойчивый тренд на рост потребления электроэнергии, с дефицитом в 3 ГВт к 2030 г., для чего необходим поиск новых путей увеличения пропускной способности инфраструктуры, в том числе линий электропередачи. При этом владельцам электрических сетей следует контролировать критические параметры длительно допустимых и аварийно-допустимых нагрузок для объектов эксплуатации и передавать информацию в диспетчерские центры, для чего требуется создать комплексную модель нагрузочной способности проводов ЛЭП.

2. Получена комплексная математическая модель расчета величины критических токовых нагрузок, в которой составлено уравнение теплового баланса провода, учитывающее параметры окружающей среды, изменения сопротивления и теплоёмкости в зависимости от температуры, а также сложную структуру сталеалюминевых проводов, позволяющая впервые оценивать величину протекающего тока для интервала времени 10 с, 20 с, 30 с, 40 с, 50 с, 1 мин, 2 мин, 3 мин, 4 мин, 5 мин, 10 мин, и степень загрузки по механической прочности и габариту ЛЭП.

3. Разработан испытательный стенд для исследования тепловых процессов в проводе с автоматизированным контролем температуры воздуха, температуры провода и заданного тока, имеющий расхождение с математической моделью не более 5 %.

4. Проведены экспериментальные исследования динамики тепловых процессов в различных режимах эксплуатации проводов ЛЭП для разных марок: АС-25, АС-35, АС-50, АС-70, АС-95, АС-120, АС-150, АС-185, А-35, А-50, А-70, А-95, А-120, А-150, А-185, М-95, М-120, подтверждающие адекватность полученной математической модели и сформулирован вывод о достоверности разработанной методики для использования в эксплуатации.

5. Разработан алгоритм для автоматизации расчетов, на основе которого создан программный продукт в среде 1С: Предприятие, позволяющий владельцам электрических сетей определять допустимые нагрузки разной длительности для объектов эксплуатации, что является важнейшим показателем пропускной способности линии электропередачи. В результате внедрения программно-аппаратного комплекса АДТН в Хабаровские электрические сети – филиала АО «ДРСК» экономический эффект составляет 1285,57 тыс. руб. в год.

Рекомендации и перспективы дальнейшего развития результатов диссертационной работы:

- совершенствование методики оценки критических параметров длительно допустимых и аварийно-допустимых нагрузок в режиме реального времени;

- разработанный алгоритм для автоматизации расчетов, на основе которого создан программный продукт в среде 1С: Предприятие, рекомендован для внедрения в различные электросетевые предприятия, а также создаваемые территориально-сетевые организации, производящие обслуживание линий в каждом регионе страны;

- использование в качестве исходных параметров при построении цифровой информационной модели линии электропередачи.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах и изданиях перечня ВАК Российской Федерации

1. Игнатенко, И. В. Внедрение программного продукта по определению аварийно допустимых токов в линиях электропередачи / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] // Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2022. – Т. 18, № 1. – С. 24–32.

2. Игнатенко, И. В. Автоматизация измерений параметров режима работы проводов линий электропередачи при исследовании процесса нагрева / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль. – 2022. – № 2(40). – С. 53–60.

3. 2. Игнатенко, И. В. Формирование цифровой модели процесса нагрева проводов линии электропередачи / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 1. – С. 13–21.

4. Игнатенко, И. В. Моделирование процесса нагрева проводов линии электропередачи в программной среде Elcut / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 1. – С. 22–35.

5. Игнатенко, И. В. Автоматизация измерений параметров линий электропередачи / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] // Электронный сетевой политематический журнал «Научные труды КубГТУ». – 2022. – № 3. – С. 128–137.

6. Игнатенко, И. В. Алгоритм контроля токов в ЛЭП в заданных эксплуатационных условиях / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] // Энергия единой сети. – 2021. – № 3(58). – С. 44–53.

Патенты

7. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2021664633 Российская Федерация. Расчет аварийно-допустимых токов проводов линий электропередачи по условию сохранения механической прочности и габарита : № 2021663632 : заявл. 02.09.2021 : опубл. 10.09.2021 / И. В. Игнатенко, **А. И. Пухова**, С. А. Власенко, Е. Ю. Тряпкин ; заявитель Акционерное общество «Дальневосточная распределительная сетевая компания».

8. Свидетельство о государственной регистрации базы данных № 2024622326 Российская Федерация. База данных критических токовых значений проводов и тросов контактной сети и воздушных линий электропередачи : № 2024622037 : заявл. 20.05.2024 : опубл. 29.05.2024 / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, С. В. Клименко, **А. И. Пухова** ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

9. Патент на полезную модель № 226150 U1 Российская Федерация, МПК В60М 1/12, G01R 31/00. Испытательный стенд для токопроводящих элементов контактной подвески и линий электропередачи : № 2023128412 : заявл. 01.11.2023 : опубл. 22.05.2024 / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] ; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения».

Прочие основные публикации

10. Кобылицкий, А. Н. Эффективность использования автоматизированного расчёта аварийно допустимых токов в линиях электропередачи / А. Н. Кобылицкий, И. В. Игнатенко, **А. И. Пухова** [и др.] // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. – 2022. – № 3(59). – С. 21–26.

11. **Пухова, А. И.** Повышение эффективности работы ЛЭП путем определения критических токовых нагрузок разной длительности / **А. И. Пухова** // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XXV краевого конкурса молодых ученых (Хабаровск, 16–20 января 2023 г.) / Редколлегия: Ю.С. Марфин (отв. редактор) [и др.] – Хабаровск : Тихоокеанский государственный университет, 2023. – С. 75–81.

12. **Пухова, А. И.** Автоматизация расчёта величины аварийно-допустимых токовых нагрузок разной длительности действия / **А. И. Пухова, И. В. Игнатенко** // Производственные технологии будущего: от создания к внедрению: Материалы VI Международной научно-практической конференции молодых ученых (Комсомольск-на-Амуре, 5–11 декабря 2022 г.). В 2 ч. Ч. 1 / Редколлегия: С. И. Сухоруков (отв. ред.) [и др.]. – Комсомольск-на-Амуре : Комсомольский-на-Амуре государственный университет, 2023. – С. 236–239.

13. Игнатенко, И. В. Программа расчета аварийно допустимых значений токов воздушных линий электропередачи / И. В. Игнатенко, **А. И. Пухова, С. А. Власенко** [и др.] // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2022. – Т. 2. – С. 28–32.

14. Шишкина, А. С. Особенности определения аварийно допустимых токов в линиях электропередачи / А. С. Шишкина, М. А. Сугоровский, **А. И. Пухова** [и др.]. // Научно-техническое и экономическое сотрудничество стран АТР в XXI веке. – 2021. – Т. 2. – С. 9–13.

15. Игнатенко, И. В. Определение предельных токовых нагрузок воздушных линий электропередачи с учетом сохранения их габарита / И. В. Игнатенко, С. А. Власенко, **А. И. Пухова** [и др.] // III Международный научно-образовательный форум «Хэйлунцзян-Приамурье» : сборник материалов Международной научной конференции (Биробиджан, 3 октября 2019 г.). – Биробиджан : Приамурский государственный университет имени Шолом-Алейхема, 2019. – С. 663–672.

ПУХОВА Анастасия Игоревна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ РАБОТЫ ЛЭП
НА ОСНОВЕ КОМПЛЕКСНОЙ МОДЕЛИ НАГРУЗОЧНОЙ СПОСОБНОСТИ ПРОВОДА**

Специальность 2.4.2. Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Подписано в печать 28.04.2025 г. Формат 60×84¹/₁₆. Усл. печ. л. 1,4. Зак. 00. Тираж 100 экз.

Отпечатано в Издательстве ДВГУПС.
680021, г. Хабаровск, ул. Серышева, 47.