На правах рукописи



Будко Степан Игоревич

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС СИСТЕМЫ ПЛАВКИ ГОЛОЛЁДА НА ПРОВОДАХ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ БЕЗ ОТКЛЮЧЕНИЯ НАГРУЗКИ

Специальность 2.4.2 - Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Самара 2026

Работа выполнена на кафедре «Электроснабжение промышленных предприятий» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Базаров Александр Александрович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет»

Официальные оппоненты: **Степанов Сергей Фёдорович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроэнергетика и электротехника» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.», г. Саратов

Валеев Азат Рустамович, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника и электротехнология» ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий», г. Уфа

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Тольяттинский государственных университет», г. Тольятти

Защита диссертации состоится «23» декабря 2026 г. в 10 часов 00 минут на заседании диссертационного совета 24.2.377.06 на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Самарский государственный технический университет» по адресу: г. Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, ауд. №200.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Самарского государственного технического университета (ул. Первомайская, 18), и на сайте ФГБОУ ВО «Самарский государственный технический университет» https://24237706.samgtu.ru.

Отзывы по данной работе в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по адресу: Россия, 443100, Самара, ул. Молодогвардейская, 244, Главный корпус, Самарский государственный технический университет, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.377.06; факс: (846) 278-44-00, e-mail: a-ezhova@yandex.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь диссертационного совета 24.2.377.06
кандидат технических наук, доцент Е.В. Стрижакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы

Проблема гололёдообразования особенно актуальна для регионов с повышенной влажностью, низкими температурами и ветровой активностью.

Наиболее эффективный метод борьбы — нагрев проводов большим током. Однако существующие установки плавки гололеда требуют отключения линии и потребителей, длительной подготовки, что приводит к продолжительным перебоям в электроснабжении и низкой оперативности.

Минимизация ущерба возможна при оперативном обнаружении гололёда и плавке без отключения нагрузки, что возможно при использовании резерва мощности источника для загрузки линии реактивными токами, обеспечивающими достаточное тепловыделение.

На сегодняшний день отсутствуют апробированные методики расчёта тепловых режимов плавки гололёда без отключения нагрузки; не определены режимы работы линий электропередачи в режиме плавки без отключения нагрузки, при которых гарантируется поддержание нормативного уровня напряжения у потребителей, исключается термическое повреждение проводов.

Таким образом, существует необходимость в дальнейших исследованиях, направленных на разработку и применение электротехнического комплекса плавки без отключения нагрузки.

Степень разработанности проблемы

Способ очистки проводов от налипшего гололеда путем нагрева электрическим током является широко применяемым на трассах ЛЭП. Исследованию процессов образования гололёда, их прогнозированию, а также разработке методов борьбы с этим явлением посвящено значительное количество трудов российских и зарубежных специалистов.

Вопросы мониторинга, прогнозирования и обнаружения гололёдных отложений рассмотрены в работах Д.А. Ярославского, Е.И. Сацука, В.А. Соловьева и Р.Г. Минуллина. Разработка аппаратных средств и устройств контроля отражена в патентах И.И. Левченко и В.Я. Башкевича. Расчет нестационарных температурных режимов и нелинейных процессов теплообмена рассмотрен в работах В.Н. Горюнова и С.С. Гиршина. Моделирование процессов в электротехнических установках для плавки гололеда с использованием реактивных токов на ВЛ 10 кВ представлено в работах А.Г. Лютова, В.В. Карташова, Г.Э. Рахматуллиной и Л.Э. Рогинской. Разработка способов, электротехнических комплексов и систем для плавки гололёда представлена в научных публикациях и патентах И.И. Левченко, А.С. Засыпкина, Е.И. Сацука, А.Ю. Елизарьева, М.Б. Гузаирова и В.И. Каганова. Теоретические основы и физика атмосферного обледенения конструкций отражены в работах зарубежных ученых: M. Farzaneh, L. Makkonen, S. Fikke.

Несмотря на большое число исследований, остаются нерешёнными следующие вопросы:

- разработка математических моделей тепловых процессов в проводнике с ледяной оболочкой, с учетом неравномерного таяния льда при разной температуре воздуха и скорости ветра;

- определение величины тока в линии, обеспечивающей достаточную мощность тепловыделения для плавления льда без перегрузки трансформатора и перегрева провода.

Особенностью разработки электротехнического комплекса для плавки гололёда на ЛЭП 10 кВ без отключения потребителей является необходимость учета дефицита мощности, ограничений по времени переключений и несовершенства систем контроля. На линиях 6–10 кВ требуется тщательное обоснование величины тока линии, чтобы обеспечить плавление гололеда без перегрузки трансформатора и без перегрева проводов.

Цель диссертационной работы - разработка электротехнического комплекса для плавки гололёда на линиях 10 кВ без отключения потребителей и снижения качества напряжения с помощью численного моделирования тепловых процессов в проводах с обледенением и электромагнитных процессов в электрической линии.

Объектом исследования является электротехнический комплекс системы плавки гололёда на проводах ЛЭП напряжением 10 кВ, обеспечивающий расплавление и опадение ледяной муфты без предварительного отключения конечных потребителей.

Предмет исследования – электромагнитные, тепловые и гидродинамические процессы в системе проводов с ледяной оболочкой и окружающей воздушной среде, электрические режимы работы ЛЭП при нормальной работе и в условиях плавки.

Задачи диссертационного исследования:

- разработка математической модели электромагнитных процессов в системе проводов ЛЭП;

- разработка математических моделей тепловых процессов в системе «воздух – ледяная оболочка – проводник» в условиях образования гололёда на проводах ЛЭП;

- исследование тепловых процессов в системе «проводник – ледяная оболочка – окружающая среда» во время плавки гололеда;

- разработка математической модели термогидродинамического процесса в системе «воздух – поверхность провода» для определения параметров процесса теплообмена;

- разработка методики расчета времени плавки гололеда и определения коэффициентов теплообмена на проводах ЛЭП;

- расчет параметров системы «трансформатор – конденсаторные установки параллельной и последовательной компенсации – ЛЭП – реактор» с целью обеспечения заданного режима плавки, ограничения токов и поддержания допустимого отклонения напряжения у потребителей;

Решение перечисленных выше проблем в совокупности составляет основное содержание диссертации, выполненной автором в Самарском государственном техническом университете.

Методы исследования

Для решения поставленных в диссертационной работе задач использовались методы математического моделирования, теории тепловых, электромагнитных и термогидродинамических процессов, численные методы решения электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов, методы компьютерного моделирования.

Научная новизна

1. Разработана уточненная математическая модель тепловых процессов в системе «провод – ледяная оболочка – окружающая среда», отличающаяся учетом влияния направления ветра на значения коэффициента теплообмена с окружающей средой локальных участков системы, изменяющихся физических свойств в процессе плавлении ледяной оболочки.
2. Определен алгоритм расчета процесса проплавления ледяной оболочки без перестроения сетки конечных элементов в системе «проводник – ледяная оболочка», позволяющий рассчитать скорость и время опадения ледяной оболочки при плавке;
3. Предложен комплексный подход к определению параметров электротехнического комплекса плавки гололёда без отключения нагрузки, основанный на совместном использовании математического моделирования тепловых процессов в проводнике и анализа электрических режимов оборудования сети 10 кВ.

Практическая значимость результатов работы

Практическая ценность проведенных исследований определяется следующими результатами:

1. Разработана усовершенствованная методика расчёта тепловых процессов при плавке гололёда, отличающаяся учётом конструктивных параметров проводов, которая позволяет определить минимальное время воздействия тока, необходимое для разрушения ледяной оболочки, что даёт возможность исключить длительный нагрев провода и сократить энергозатраты на плавку;
2. Предложена усовершенствованная методика расчёта тепловых потоков с поверхности провода и коэффициентов конвективного теплообмена с окружающей средой, которая позволяет учитывать направление и скорость ветра, что повышает точность определения времени, необходимого для плавки гололёда, и снижает риск перегрева провода;

3. Разработана компьютерная модель электрических процессов системы «трансформатор – устройства последовательной и параллельной компенсации реактивной мощности - линия электропередачи – нагрузочный реактор», позволяющая определять параметры системы, обеспечивающие стабильное напряжение на зажимах потребителей в режиме плавки;

4. Создана и апробирована методика расчёта параметров схемы плавки гололёда и выбора оборудования, которая позволяет определить режим плавки при ограниченной мощности трансформатора и пропускной способности линии, что даёт возможность использовать предложенный комплекс на существующих подстанциях без модернизации основных силовых элементов;

5. Обоснована эффективность применения автоматизированного комплекса, исключающего ручные переключения и участие оперативного персонала. Предложенный подход позволяет повысить надежность электроснабжения потребителей и сократить время процесса плавки гололёда по сравнению с классическими методами.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждаются корректным использованием математического аппарата и согласованием с данными, известными из литературы.

На защиту выносятся:

1. Математические модели тепловых процессов в проводнике с ледяной оболочкой в режиме плавки гололёда, учитывающие перемещение ледяной оболочки относительно провода;

2. Математическая модель термогидродинамических процессов в системе «провода ЛЭП – воздух», позволяющая определить коэффициенты конвективного теплообмена на поверхности провода при различных скорости и направлении ветра;

3. Методика определения электрических параметров системы плавки гололеда и выбора силового оборудования на базе компьютерного моделирования, учитывающая ограниченную мощность силового трансформатора и пропускную способность линии;

4. Система плавки гололёда на проводах ЛЭП 10 кВ, функционирующая в условиях бесперебойного электроснабжения потребителей.

Соответствие паспорту специальности

Диссертация соответствует паспорту специальности 2.4.2 – Электротехнические комплексы и системы по п.1. «Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем», п.3. «Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов

эффективного управления», п.4. «Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях».

Апробация работы

Материалы диссертационного исследования докладывались и обсуждались на: X Международной научно-практической конференции «Мировые тенденции развития науки и техники: пути совершенствования» (г. Москва, 2022); II Всероссийской с международным участием молодежной конференции «Бутаковские чтения» (г. Томск, 2022); XXXII Всероссийской научно-практической конференция «Наука и образование в новых реалиях: проблемы, дискуссии, пути совершенствования» (г. Ростов-на-Дону, 2023); Международной научно-технической конференции «Автоматизация, энергетика и машиностроение: технологии и инновации»; Международной научно-практической конференции «Теоретические и практические аспекты развития современной науки» (г. Нефтекамск, 2026); Международной научно-практической конференции «Современная наука: теоретический и практический взгляд» (г. Астана, 2026).

Личный вклад автора. В работах, выполненных в соавторстве, соискателю принадлежит: анализ существующих методов обнаружения гололёда; разработка математических и компьютерных моделей; моделирование и анализ термогидродинамических процессов в системе «воздух – поверхность провода»; постановка задачи, моделирование и анализ эффективности алгоритма расчета тепловых процессов в проводах; разработка методики расчета силового электрооборудования, его расчет и выбор, настройка компьютерной математической модели электрических процессов в цепи системы плавки; определение параметров схемы и моделирование режима работы ЛЭП при плавке гололёда, регулировка параметров, приводящих к возникновению последовательного резонанса напряжений в сети.

По результатам диссертационной работы опубликовано 17 печатных работ, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Реализация результатов работы

Результаты исследований электромагнитных, тепловых и термогидродинамических процессов в проводниках ЛЭП и окружающей среде при плавке гололёда, в части методики проектирования, математических моделей, компьютерного моделирования, внедрены в учебном процессе СамГТУ (г. Самара) при подготовке бакалавров по профилю «Электротехнологические установки и системы» и магистров по направлению подготовки «Электроэнергетика и электротехника». Результаты расчета и выбора силового электрооборудования для системы плавки в виде методики проектирования и математического компьютерного моделирования внедрены в практику подготовку бакалавров профиля «Электроснабжение» и

магистров профиля «Оптимизация систем электроснабжения и повышение их эффективности». Разработанные в диссертации научные положения внедрены в проектную практику ООО «Проект-Электро» (г. Самара) в виде методик расчета тепловых и термогидродинамических процессов в системе «провод - ледяная оболочка – воздух», при определении и выборе силового электрооборудования для систем плавки гололёда.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения, изложенных на 163 страницах машинописного текста; содержит 51 рисунка и 19 таблиц, список использованных источников, включающий 127 наименования, 9 приложений.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы, сформулированы цель, задачи, научная новизна, практическая значимость и основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе выполнен обзор существующих технологий и систем плавки гололёда. Проанализированы методы и устройства борьбы с обледенением. Рассмотрены современные методы обнаружения гололёда: весовые, по провису, локационное зондирование, беспроводные и интеллектуальные системы, а также гравитационный, аэродинамический и ёмкостный способы. Показано, что существующих способов диагностики в изолированном виде недостаточно.

Проанализированы методы прогнозирования гололёдообразования, включая математическое моделирование метеозависимостей и нейросетевой анализ, для заблаговременной оценки необходимости плавки.

Выполнен обзор методов борьбы с гололёдом. Большинство из них требуют отключения линии, а работающие без отключения потребителей либо ориентированы на ВЛ высокого напряжения, либо сложны, дороги и не нашли широкого применения.

Анализ существующих технологий показал, что большинство применяемых способов плавки требуют длительного отключения линии, что недопустимо для современных требований к надежности электроснабжения. Важнейшей проблемой способов плавки без отключения - за счет нагружения линий реактивной мощностью, являются глубокие просадки напряжения в узлах нагрузки и риск термического повреждения провода.

Сделан вывод о необходимости разработки усовершенствованной системы плавки без отключения нагрузки и сформулированы задачи диссертации.

Во второй главе разработаны математические модели электромагнитных, тепловых и гидродинамических процессов в системе «провод – ледяная оболочка – воздух».

Электромагнитная задача формулируется в виде системы уравнений Максвелла. С учетом введенного магнитного векторного потенциала $\mathbf{A}$,

преобразованная система уравнений, удобная для численной реализации, принимает вид уравнения Пуассона:

$$j\omega \cdot \sigma \cdot \mathbf{A} + \nabla(\mu_0^{(-1)} \cdot \mu_r^{(-1)} \cdot \mathbf{A}) = \mathbf{J}_z^e \cdot \mathbf{e}_z; \quad (1)$$

$$\mathbf{A} = \mathbf{A}_z \cdot \mathbf{e}_z. \quad (2)$$

Здесь: μ_r – относительная магнитная проницаемость среды; $\mathbf{J}_z^e$ – плотность внешнего тока; e_z - электрический потенциал, приложенный к проводнику; z – координатная ось; σ – электропроводность.

Граничные условия заданы в виде равенства нулю магнитного потенциала на границе расчетной области:

$$\mathbf{A}_z = 0. \quad (3)$$

Тепловая задача формулируется в виде дифференциального уравнения в частных производных для двумерной области с внутренними источниками тепла:

$$\rho C_P \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \cdot \left(\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial y} \right) + w; \quad (4)$$

Где: ρ – плотность материала; C_P – удельная теплоемкость; λ – коэффициент теплопроводности; T – температура; w – удельная мощность тепловыделения.

Начальные условия заданы в виде распределения температуры:

$$T(x, y, 0) = T_0(x, y). \quad (5)$$

Граничные условия на боковой поверхности проводника описывают конвективный теплообмен:

$$\lambda \cdot \frac{dT}{dn} = \alpha \cdot (T - T_C). \quad (6)$$

Здесь: α - коэффициент конвективного теплообмена; T_C - температура окружающей среды, n – нормаль к линии границы.

Математическая модель теплового процесса для системы «однородный провод – лёд – воздух» формулируется в виде:

$$\rho_k C_k \frac{\partial T_k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda_k \frac{\partial T_k}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda_{np} \frac{\partial T_k}{\partial y} \right) - \nu \frac{\partial T_k}{\partial y} + w + b \frac{\partial T_k}{\partial n}; \quad (7)$$

где: ν - вертикальная составляющая скорости для учёта движения оболочки относительно провода; n - вектор, перпендикулярный поверхности раздела твердой (лёд) и жидкой фаз (вода); b - скорость движения фронта плавления.

Процесс плавления учтен с помощью внесения локального увеличения теплоемкости на участке перехода через точку плавления:

$$C = C_0 + \frac{L}{\Delta T}. \quad (8)$$

Здесь: L - теплота плавления; ΔT - заданный интервал температур участка плавления (в расчетах принято значение 1 градус).

Для решения тепловой задачи требуется определить коэффициент теплообмена между поверхностью провода и воздушным потоком. При упрощенном подходе используется критериальная система. Коэффициент конвективного теплообмена определяется через безразмерный критерий Нуссельта Nu.

$$\alpha = \frac{Nu \cdot \lambda}{D}. \tag{9}$$

Где: D - диаметр провода (ледяной оболочки).

Уточненные расчеты процесса теплообмена в системе «провод – воздушная среда» производятся с помощью численного решения связанной задачи гидродинамики и теплопроводности.

Задача гидродинамики формулируется в следующем виде:

– уравнение неразрывности:

$$\nabla \cdot \mathbf{v} = 0, \tag{10}$$

– уравнение Навье – Стокса:

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \cdot \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \cdot \nabla p \cdot \eta \cdot \nabla^2 \cdot \mathbf{v}, \tag{11}$$

Здесь: $\mathbf{v}$ - вектор скорости; ∇ - оператор Набла; p - гидродинамическое давление; ρ - плотность воздушной среды; ∇^2 - оператор Лапласа, η - кинематическая вязкость воздуха

Расчетная $k-\varepsilon$ модель включает два уравнения: для кинетической энергии турбулентности k и её диссипации ε. Дифференциальные уравнения имеют вид:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + div(\rho \cdot \mathbf{v} \cdot k) = div\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) grad(k)\right) + P_k - \rho\varepsilon + P_{kb}; \tag{12}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(p\varepsilon) + div(\rho \cdot \mathbf{v} \cdot \varepsilon) = div\left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right) grad(\varepsilon)\right) + \frac{\varepsilon}{k} \cdot (C_{\varepsilon 1} \cdot P_k - C_{\varepsilon 2} \cdot \rho\varepsilon + C_{\varepsilon 1} \cdot P_{\varepsilon b}); \tag{13}$$

где k – кинетическая энергия турбулентности; ε – диссипация энергии турбулентности; p - давление; P_k – генерируемая энергии турбулентности; P_{kb} и $P_{\varepsilon b}$ – слагаемые, учитывающие эффекты гравитации.

Совместное решение уравнений (4-6) и (14-15) позволяет определить тепловые потоки на участках поверхности провода и коэффициенты теплообмена вдоль линии окружности проводника, с учетом направления и скорости ветра. Полученные значения способствуют повышению точности расчетов процесса плавки гололеда на базе выражений (5) – (8).

Электрические процессы в системе «трансформатор – линия электропередачи – нагрузочный реактор – конденсаторные батареи» описываются системой уравнений, базирующейся на законах Кирхгофа и теории цепей переменного тока. Распределение узловых напряжений $\underline{U}_i$ и токовых нагрузок для $i-го$ узла цепи описывается в комплексной форме:

$$\underline{I}_{Л,i} = \underline{I}_{Л,i+1} + \underline{I}_{H,i}; \tag{14}$$

$$\underline{U}_i = \underline{U}_{i-1} - \underline{I}_{Л,i}\underline{Z}_{Л,i}, \tag{15}$$

Здесь: $\underline{I}_{Л,i}$ - ток $i-го$ участка линии; $\underline{I}_{H,i}$ - ток $i-го$ электроприемника (зависящий от импеданса нагрузки узла); $\underline{U}_i$ - напряжение в $i-м$ узле; $\underline{Z}_{Л,i}$ - комплексное сопротивление $i-го$ участка магистрали.

Для эквивалентной последовательной цепи переменного тока полное комплексное сопротивление контура плавки определяется выражением:

$$\dot{Z} = R + j(X_L - X_C), \tag{16}$$

где: R - эквивалентное активное сопротивление контура, Ом; X_L - суммарное индуктивное сопротивление линии и реактора, Ом; X_C - ёмкостное сопротивление установки продольной компенсации, Ом.

Действующее значение тока определяется по закону Ома:

$$I = \frac{U_{пит}}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}. \tag{17}$$

Продольная составляющая падения напряжения в линии рассчитывается как:

$$\Delta U_л = \sqrt{3} I_{пл} \left(R_л \cos\varphi + X_л \sin\varphi \right), \tag{18}$$

где: $\cos\varphi$ - коэффициент мощности эквивалентной нагрузки; $X_л$ - результирующее реактивное сопротивление контура.

Фактическое напряжение на зажимах потребителя в конце линии составит:

$$U_{кон} = U_{ном} - \Delta U. \tag{19}$$

Система предусматривает настройку контура в режим, близкий к последовательному резонансу напряжений при выполнении условия

$$X_L = X_C \tag{20}$$

Ёмкость конденсатора, необходимая для достижения резонанса:

$$C_{рез} = \frac{1}{(2\pi f)^2 L}, \tag{21}$$

где: L - эквивалентная индуктивность контура.

В третьей главе на основе разработанных математических моделей выполнено компьютерное моделирование тепловых, гидродинамических и электромагнитных процессов.

В качестве объекта исследования выбран сталеалюминиевый провод марки АС-50/8, широко применяемый в распределительных сетях 10 кВ. Значения длительно-допустимого тока и расчетного тока плавки и соответствующих им потерь мощности приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры режимов плавки для провода АС-50

режим	длительный	плавка
I, А	210	420
$P_{уд}$, Вт/м	26,54	106,19

Для исследования динамики плавления разработана компьютерная модель тепловых процессов, с помощью которой найдено распределение температуры в проводе и ледяной муфте, а также время достижения температуры плавления на границе раздела сред при различных погодных условиях.

Для корректного задания граничных условий на поверхности раздела «лед – воздух» рассчитаны значения коэффициента конвективного теплообмена для каждого значения скорости ветра. Зависимости коэффициента теплообмена от скорости ветра для разных значений ледяной оболочки для провода АС-50/8 представлены на рис. 1.

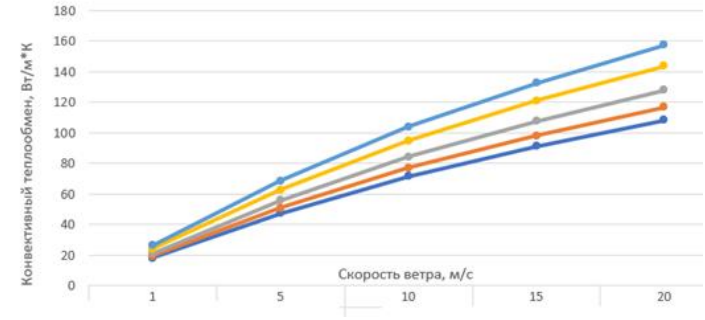


Рисунок 1. Зависимости коэффициентов конвективного теплообмена для проводника с различной толщиной ледяной оболочки

d=20 мм; d=15 мм; d=10 мм; d=5 мм; d=2 мм.

Результаты расчёта температуры для провода АС-50/8 при токе в линии 210 А представлены на рис. 2 (распределение температуры) и рис. 3.

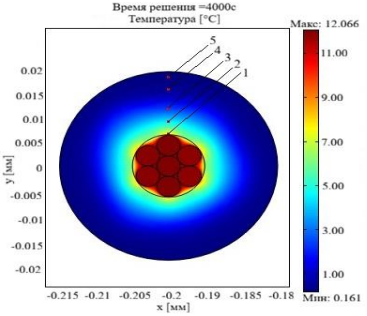


Рисунок 2. Распределение температуры в проводе АС-50/8 с толщиной ледяной оболочки 20 мм в момент времени t=4000с, при нулевой скорости ветра, температуре воздуха -5°С, мощности тепловыделения 26,45 Вт/м^2.

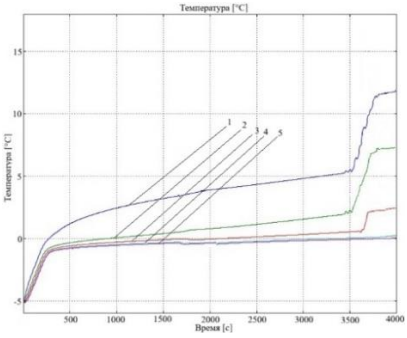


Рисунок 3. Диаграммы температуры в проводе и ледяной оболочке от времени в точках на расстоянии от поверхности провода: 1 – 0 мм; 2 - 5 мм; 3 – 10 мм; 4 – 16 мм; 5 – 18 мм.

Анализ установившихся значений температуры показывает, что при протекании длительно-допустимого тока 210 А не обеспечиваются условия для разрушения ледяной муфты при наличии ветра. При переходе к удвоенному току (420 А) обеспечивается прогрев границы раздела сред до 0 °С. В то же время, режим плавки при токе 420 А при полном безветрии может привести к перегреву. Температура провода в стационарном режиме может достичь 272,8 °С. Данный факт требует строгого ограничения времени протекания тока для предотвращения термического разрушения провода.

Использование детальной многопроволочной геометрии провода при расчете приводит к сильному искажению формы конечных элементов и плохой сходимости решения. Осуществлен переход к эквивалентной моножильной модели провода. Эквивалентные свойства моножильной модели получены методом объёмного усреднения.

Для уточненного моделирования процесса плавки необходимо учитывать относительное смещение ледяной муфты, вызванное гравитацией при образовании водяной пленки на границе раздела. Вертикальная скорость опускания оболочки была задана постоянной. Результаты моделирования с учётом движения оболочки представлены на рис. 4 и 5.

Для эффективной плавки гололёда осуществлен переход к режиму расчетного тока плавки с удвоенной тепловой мощностью. Анализ данных для режима плавки при расчетном токе (298 А) подтверждает эффективность данного решения.

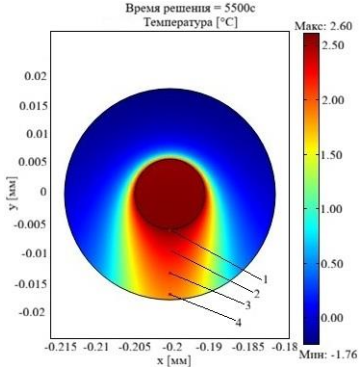


Рисунок 4. Распределение температуры в однородном проводе АС-50/8 с ледяной оболочкой 20 мм при скорости ветра 0 м/с, температуре воздуха -5 °С, мощности 26,45 Вт/м^2.

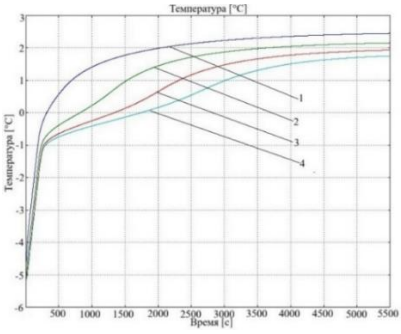


Рисунок 5. Временные диаграммы температуры в точках на расстоянии от поверхности провода: 1 – 0 мм, 2 - 7 мм, 3 - 14 мм, 4 - 19 мм.

В плотном льду достигается стабильно положительная температура в зоне контакта, что обеспечивает условия для формирования устойчивой водяной пленки. Выбор тока из условия удвоения тепловой мощности, а не самого тока, позволяет существенно снизить общие энергозатраты на плавку и избежать опасного перегрева провода.

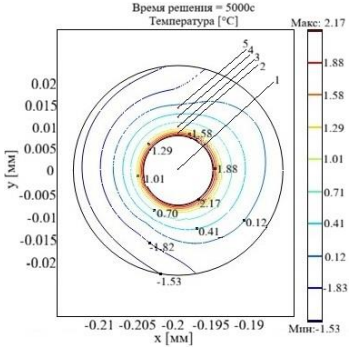


Рисунок 6. Распределение температуры в проводе и ледяной оболочке 20 мм при скорости перемещения провода 0,1 мм/с, скорости бокового ветра 5 м/с, температуре -5°С.

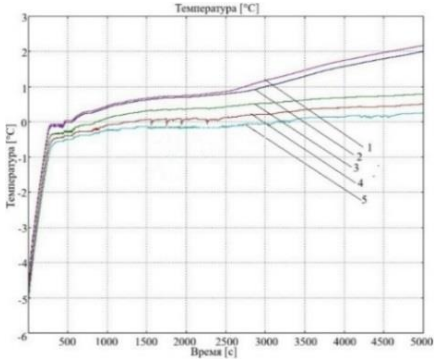


Рисунок 7. Временные диаграммы температуры в ледяной оболочке на расстоянии от поверхности провода: 1 – 0,1 мм, 2 – 2 мм, 3 – 4 мм, 4 – 7 мм.

С увеличением толщины оболочки максимальная температура снижается, а время полного проплавления растёт. Сравнение результатов

показывает, что разница во времени проплавления плотной и рыхлой структур нелинейно зависит от толщины оболочки и интенсивности обдува. С увеличением скорости ветра или толщины стенки муфты требуемое время плавки возрастает, а максимальная достигаемая температура снижается. Результаты представлены в таблице 2 и на рис. 8 и 9.

Таблица 2

Влияние толщины оболочки на время плавления

Толщина оболочки, [*мм*]	*Состояние льда*	T_{min},[°C]	T_{max},[°C]	$t_{плавки}$,[c]
5	плотный	32	38	3100
5	рыхлый	16	20	3100
10	плотный	26	37	4500
15	плотный	12,5	21,5	5500

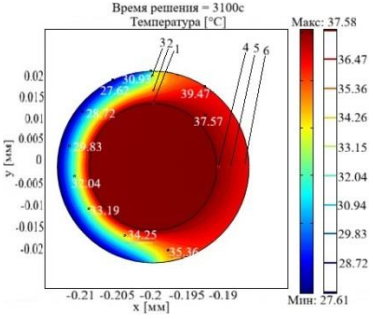


Рисунок 8. Распределение температуры в проводе с оболочкой из плотного льда в момент времени 3100 секунд при скорости перемещения провода 0,5 мм/сек, скорости бокового ветра 5 м/с, мощности 52,9 Вт/м^2.

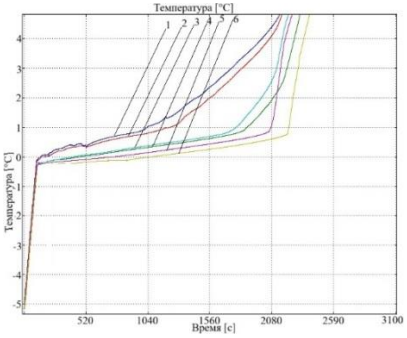


Рисунок 9. Диаграммы температуры для точек в ледяной оболочке на расстоянии от правой границы провода: 1 – 0 мм; 2 - 2 мм; 3 – 5 мм; 4 – 6 мм; от левой границы провода: 5 – 2 мм; 6 – 5 мм.

Интенсивность конвективного теплообмена является определяющим параметром. Для минимизации расчетной погрешности и перехода от усредненных коэффициентов теплообмена к уточненным локальным значениям применяется связанная термогидродинамическая модель процесса в системе «провод - ледяная оболочка - воздух».

На рис. 10, 11 представлены распределения температуры при скорости ветра 1 и 10 м/с, из которых видно, что тепловой шлейф наблюдается в виде узкой полосы.

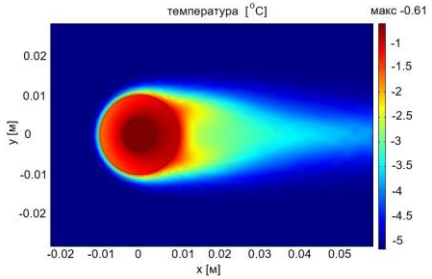


Рисунок 10. Распределение температуры при скорости ветра 1 м/с при ламинарном характере движения.

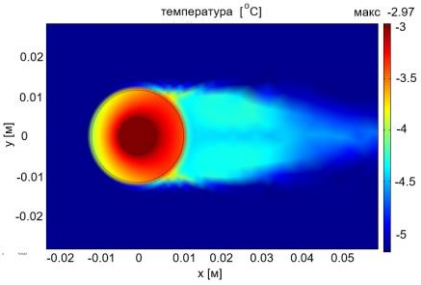


Рисунок 11. Распределение температуры при скорости ветра 10 м/с при турбулентном характере движения.

Построены диаграммы распределения плотности теплового потока и температуры вдоль дуги, приведенные на рис.12,13.

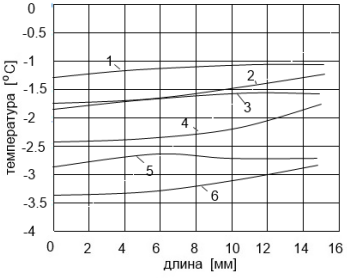


Рисунок 12. Диаграммы температуры на поверхности провода при скорости ветра: левая верхняя дуга; 1 - 1 м/с; 3 - 5 м/с; 5 - 10 м/с; правая верхняя дуга: 2 - 1 м/с; 4 - 5 м/с; 6 - 10 м/с.

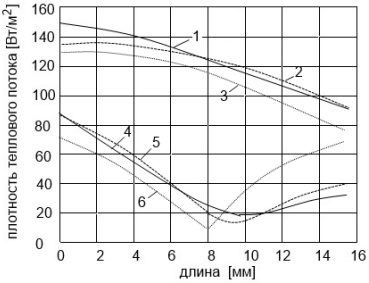


Рисунок 13. Диаграммы плотности теплового потока на поверхности провода при скорости ветра: левая верхняя дуга: 1 - 1 м/с; 2 - 5 м/с; 3 - 10 м/с; правая верхняя дуга: 4 - 1 м/с; 5 - 5 м/с; 3 - 10 м/с.

По результатам численного интегрирования значений тепловых потоков и средних температур определены коэффициенты конвективного теплообмена для участков окружности провода, которые представлены в таблице 3.

При различных значениях скорости ветра средние значения температуры на участках окружности с наветренной T_{cp}^{l} и подветренной T_{cp}^{r} сторон отличаются незначительно, но значения тепловых потоков и коэффициентов теплообмена α^{l} и α^{r} отличаются в несколько раз. В то же время, при сравнении значений, полученных при аналитическом и численном расчетах, разница значительна.

Таблица 3

Расчетные значения параметров процесса теплообмена средствами Comsol

№	v, м/с	$T^l_{ср}$, °C	$T^r_{ср}$, °C	Q^l, Вт	Q^r, Вт	Q_Σ, Вт	α^l, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	α^r, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	$\alpha_{ср}$, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	$\alpha_{ан}$, $\frac{Вт}{м^2 \cdot °C}$	ε_α, %
1	1	273.8	274.4	4	1.2	5.2	21.9	5.99	13.9	24.1	-9.2
2	5	271	271.6	3.73	1.26	4.97	37.7	11.1	24.4	63.4	-40
3	10	270.1	270.5	3.66	1.47	5.11	50.95	18.5	34.7	96	-47

Относительная погрешность аналитического расчета нелинейно возрастает с увеличением скорости ветра: от 9,2 % при 1 м/с до 47 % при 10 м/с. Расчеты с применением метода разбиения дуги на участки демонстрируют кратные расхождения между усредненными аналитическими и уточненными коэффициентами.

В четвёртой главе предложена система плавки гололёда на ЛЭП 10 кВ без отключения нагрузки. Обоснована принципиальная схема с нагрузочным реактором в конце линии и конденсаторной батареей (УКРМ) на шинах подстанции. Выполнен расчёт и выбор оборудования: нагрузочного реактора, конденсаторной батареи, включаемой параллельно линии и предназначенной для компенсации реактивной мощности, конденсаторной батареи, подключаемой последовательно с линией и предназначенной для повышения напряжения на зажимах потребителей.

Главный принцип работы предлагаемой системы заключается в искусственном увеличении токовой нагрузки на линию для достижения требуемой мощности тепловыделения. Ток плавки складывается из тока нагрузки и тока реактора. В начале линии устанавливается регулируемая конденсаторная батарея (С1), компенсирующая реактивную мощность и разгружающая трансформатор от индуктивного тока. При значительном росте тока возникает недопустимое падение напряжения в конце линии. Для решения этой проблемы последовательно с линией включается ёмкость (С2), с помощью которой достигается режим, близкий к последовательному резонансу (рис. 14).

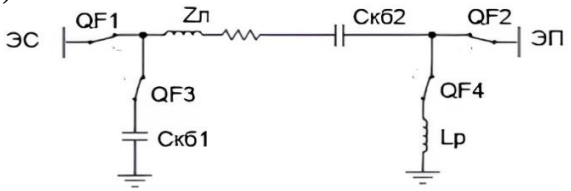


Рисунок 14. Упрощенная схема системы плавки гололёда на проводах ЛЭП 10 кВ на линии потребителя: ЭС – энергосистема; ЭП – электропотребители; QF1-QF4 – коммутационные аппараты; Скб1, Скб2 – конденсаторные батареи; Lp – нагрузочный реактор.

Увеличение тока плавки повышает нагрузку на питающий трансформатор и вызывает существенный рост потерь напряжения в ЛЭП. Рост потерь прямо пропорционален длине линии. Потери напряжения в линии длиной 10 км при токах 105 и 298 А составляют 10 и 30%. При увеличении длины линии до 20 км потери возрастают до 20 и 60%. Это требует принятия мер по повышению напряжения.

Для обоснования выбора силового оборудования и оценки режимов работы системы плавки необходимо рассмотреть питающую сеть, к которой подключается защищаемая линия. Расчёт выполнен для фидера №1, питающего по магистральной схеме группу потребителей. Схема электроснабжения районной подстанции 35/10 кВ приведена на рис.15. Протяжённость ЛЭП - 10 км, категория надёжности электроснабжения - II. Сечение провода выбрано по экономической плотности тока - АС-50/8 (длительно-допустимый ток 210 А). Для гарантированной плавки требуется ток 298 А, и погонная мощность тепловыделения 52,9 Вт/м. Было установлено, что такой режим допустим, так как температура провода не превышает 90 °С.

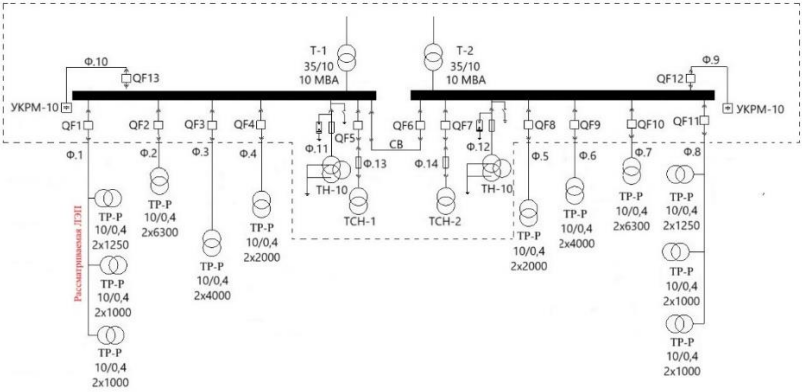


Рисунок 15. Схема электроснабжения районной сети от ПС-35/10.

Для рассматриваемой подстанции из-за ограниченной мощности силовых трансформаторов одновременная плавка возможна не более чем на одной линии. При токе плавки, равном 298 А, включение двух линий (596 А) приведёт к перегрузке трансформаторов.

В качестве базового элемента выбран масляный реактор серии РТМ-3300/10, номинальный ток которого составляет 173 А. Установка двух реакторов обеспечивает суммарную токовую загрузку реакторного узла на уровне 346 А. Данное значение надежно перекрывает требуемую потребность в добавочном токе (196,4 А) для обеспечения суммарного тока плавки в линии (298 А).

Моделирование нормального режима и плавки выполнено в программе Multisim с использованием рассчитанных значений сопротивлений линии, нагрузки, реактора и конденсаторов. При включении реактора ток в линии возрастает до 296 А, но напряжение в конце линии падает до 7,5-8 кВ. Для его восстановления до требуемого уровня последовательно с линией включается ёмкость, обеспечивающая резонанс напряжений. Расчетное напряжение на изоляторах линии не превышает 11,21 кВ, что допустимо для класса 10 кВ (максимум 12 кВ).

Путем настройки емкости продольной компенсации С2 в процессе моделирования обеспечено поддержание нормированного напряжения у потребителей (10,5 кВ), однако из-за дискретности шага регулирования реактивных элементов установившийся ток в линии составил 407,9 А. Данное значение превышает расчетный ток плавки (298 А), но является технически безопасным для электротехнического комплекса: оно укладывается в номинальный рабочий ток питающего трансформатора (530 А), а температура голого провода АС-50/8 при таком ток достигает лишь 81,4 °С, оставаясь ниже предела допустимого нагрева (90 °С).

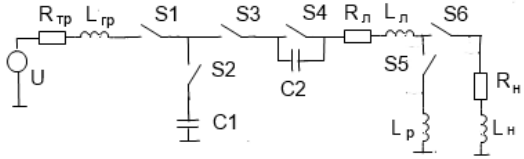


Рисунок 16. Упрощенная схема линии с регулированием напряжения на нагрузке: Rтр, Lтр - сопротивление и индуктивность трансформатора; Rл, Lл – сопротивление и индуктивность линии; L3 – индуктивность реактора; Rн, Lн – сопротивление и индуктивность нагрузки; С1, С2 – конденсаторы для компенсации реактивной мощности и для последовательного резонанса в линии; S1 – S6 – выключатели.

Расчёты подтвердили работоспособность системы для одной линии 10 кВ без увеличения мощности подстанции 35/10 кВ. Потери напряжения устранены за счёт последовательного резонанса.

Выполнена экономическая оценка технического решения. Подтверждена эффективность системы, обеспечивающей бесперебойное электроснабжение и предотвращение многомиллионных убытков. Общие капитальные затраты на оборудование и монтаж для одной линии составляют около 17,7 млн руб. Для линии 10 кВ протяжённостью 10 км ущерб от гололёдной аварии может достигать десятков миллионов рублей и зависит от масштаба разрушений. Выполнен анализ трёх типовых сценариев на основе реальных аварийных данных.

Таблица 4

Оценка ущерба для ЛЭП 10 кВ

Сценарий	Прямой ущерб (восстановление)	Косвенный ущерб (простой)	Суммарный оценочный ущерб
Локальный	4 - 7 млн. руб.	3 - 10 млн. руб.	7 - 17 млн. руб.
Массовый	15 - 30 млн. руб.	10 - 30 млн. руб.	25 - 60 млн. руб.
Катастрофический	от 30 млн. руб.	от 30 млн. руб.	от 60 млн. руб.

Таблица 5

Срок окупаемости системы плавки гололеда

Сценарий аварии	Предотвращаемый ущерб, млн руб.	Срок окупаемости, годы
Локальный	4 - 7 млн. руб.	7,6 – 13,3 лет
Массовый	15 - 30 млн. руб.	1,8 – 3,5 года
Катастрофический	от 30 млн. руб.	менее 1 – 1,8 года

Анализ показывает, что полный экономический ущерб от гололёдной аварии на линии 10 кВ может составлять от нескольких миллионов до сотен миллионов рублей, что подтверждает высокую эффективность вложений в системы плавки гололёда (СПГ).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе получены следующие основные результаты:

1. Разработан комплекс взаимосвязанных математических моделей, включающий модель нестационарных тепловых процессов с учётом фазовых переходов «лёд–вода» и смещения провода внутри ледяной муфты и модель определения уточнённых локальных коэффициентов теплообмена на основе анализа термогидродинамических процессов. Доказано, что традиционные аналитические расчеты без учета скорости и направления ветра дают погрешность до 47 % при скоростях свыше 5 м/с.

2. Разработаны методики численного моделирования тепловых, термогидродинамических и электрических режимов системы плавки гололёда, позволяющие комплексно обосновать выбор параметров оборудования.

3. Разработан и реализован алгоритм расчета тепловых процессов в программном комплексе COMSOL Multiphysics, позволяющий прогнозировать время полного проплавления ледяной оболочки в зависимости от её толщины и внешних погодных условий: установлено, что время полного проплавления составляет от 1 часа до 1,5 часов при толщине ледяной оболочки от 2 до 20 мм. На основе модели обоснован расчетный ток плавки (298 А), гарантирующий сброс льда на проводе АС-50/8 при скорости ветра до 20 м/с без критического перегрева провода.

4. Выполнен расчёт и выбор силового электрооборудования для системы плавки гололёда, включающей нагрузочный реактор в конце

линии, УКРМ и дополнительную конденсаторную батарею в начале линии, обеспечивающие протекание требуемого тока плавки при сохранении нормируемого напряжения у потребителей без превышения номинальной мощности существующих силовых трансформаторов.

5. Предложено техническое решение по компенсации падения напряжения и обеспечению нормативного качества напряжения в линии в режиме искусственного увеличения индуктивной нагрузки путем настройки последовательного резонанса с помощью дополнительной конденсаторной батареи.

6. Разработана методика математического моделирования ЛЭП в среде Multisim, позволяющая решить проблему критического падения напряжения. Установлено, что применение последовательной конденсаторной батареи (емкостью 65 мкФ) позволяет настроить цепь в режим, близкий к резонансу напряжений. Численным моделированием подтверждено, что данный режим успешно компенсирует продольные потери и восстанавливает напряжение у потребителя с 7,7 до нормативных 10,5 кВ.

7. Доказана высокая технико-экономическая эффективность комплекса, исключающего перерывы в электроснабжении и функционирующего без участия персонала. Экономический эффект от его внедрения составляет от 4 до 30 млн рублей и более в виде предотвращенного прямого ущерба электросетевого комплекса при ликвидации одной гололедной аварии. При расчетных капитальных затратах 17,66 млн руб. на один фидер срок окупаемости системы составляет от 1 года до 13,3 лет в зависимости от тяжести погодных условий. Дополнительным технологическим эффектом является сокращение времени ликвидации гололёда с 3–5 часов (классический метод) до 1–1,5 часов активного нагрева. При этом показано, что ввиду разнообразия конфигураций, длин магистралей, схем и режимных параметров распределительных сетей, для каждой конкретной ЛЭП 10 кВ требуется индивидуальное обоснование разработки и внедрения. Такое обоснование должно включать не только оценку технико-экономической эффективности, но и обязательный индивидуальный расчет требуемого тока и режимов плавки, а также подбор характеристик применяемого силового оборудования системы.

8. Результаты диссертационной работы внедрены в проектную практику компании ООО «Проект-Электро», а также используются в учебном процессе ФГБОУ ВО «СамГТУ». Дальнейшее развитие исследований может быть связано с созданием автоматизированной системы управления режимами плавки гололёда в реальном времени при использовании эксплуатирующими организациями при реконструкции и строительстве воздушных линий электропередачи 10 кВ.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

Статьи в изданиях из перечня ВАК:

1. Базаров А.А., Будко С.И. Моделирование тепловых процессов при плавке гололеда на линии электропередачи // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2023. – Т. 31, № 4. – С. 49–67.
2. Базаров А.А., Будко С.И. Исследование термогидродинамических процессов в воздушной среде в системе плавки гололёда на проводах линии электропередачи // Вестник СамГТУ. Сер. Технические науки. – 2024. – Т. 32, № 3. – С. 81–97.
3. Будко С.И. Расчёт и выбор силового электрооборудования для системы плавки гололёда без отключения нагрузки // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2026. – № 7. – С. 277–291.

Работы в других журналах и материалах научных конференций:

4. Будко, С. И. Математическое моделирование тепловых процессов нагрева и проплавления ледяной оболочки на проводах ЛЭП / С. И. Будко, Д. В. Колпаков, Н. Р. Штукатуров // Наука и образование в новых реалиях: проблемы, дискуссии, пути совершенствования: материалы XXXII Всероссийской научно-практической конференции (11 декабря 2023 г.). — Ростов-на-Дону: ООО «МАНУСКРИПТ», 2023. — С. 147–151.
5. Базаров, А. А. Моделирование процесса проплавления ледяной оболочки на проводах / А. А. Базаров, С. И. Будко, Д. В. Колпаков, Н. Р. Штукатуров // Нанотехнологии: наука и производство. — 2024. — № 6. — С. 61–67.
6. Базаров, А. А. Расчет и выбор силового электрооборудования для системы плавки гололёда без отключения нагрузки / А. А. Базаров, С. И. Будко // Нанотехнологии: наука и производство. — 2025. — № 5. — С. 12–22.

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.2.377.06
ФГБОУ ВПО ≪Самарский государственный технический университет≫
(протокол №14 от 19.10.2026 2026г.)
Заказ №249. Тираж 100 экз.
Формат 60x84/16. Отпечатано на ризографе.
ФГБОУ ВПО ≪Самарский государственный технический университет≫
Отдел типографии и оперативной печати
443100 г. Самара ул. Молодогвардейская, 244