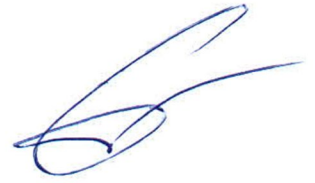


На правах рукописи



Сухоруков Сергей Иванович

АВТОМАТИЗИРОВАННАЯ СИСТЕМА УДАЛЕНИЯ ЛЬДА С ПРОВОДОВ ЛЭП

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре – 2016

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет»

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор **Соловьев Вячеслав Алексеевич**

Официальные оппоненты:

УГАРОВ Геннадий Григорьевич, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение промышленных предприятий» ФГБОУ ВО «Саратовский государственный технический университет имени Гагарина Ю.А.»

ЩУРОВ Артем Николаевич, кандидат технических наук, доцент кафедры «Электрические станции и электроэнергетические системы» ФГБОУ ВО «Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ) имени М.И. Платова»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Уфимский государственный авиационный технический университет»

Защита диссертации состоится 31 октября 2016 г. в 10:00 часов на заседании объединенного диссертационного совета Д 999.086.03, созданного на базе федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Дальневосточный государственный университет путей сообщения», федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Амурский государственный университет» по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, проспект Ленина, 27, ауд. 201-3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет», www.knastu.ru.

Автореферат разослан «___» _____ 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А.С. Гудим

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время для передачи энергии на большие расстояния из-за относительно небольшой стоимости широко применяют воздушные линии электропередачи (ЛЭП). Значительную проблему при эксплуатации ЛЭП представляют аварийные ситуации, связанные с обледенением проводов и прочих конструкций ЛЭП. Гололед образуется при низких температурах и высокой влажности воздуха, преимущественно в зимний период. Однако образование гололеда на проводах и иных конструкциях ЛЭП может происходить и в осенне-весенний период.

Наличие гололеда на проводах обуславливает возникновение дополнительных механических нагрузок на все конструктивные элементы линии. При значительных гололедных отложениях, превышающих нормативные значения, происходят обрывы проводов, тросов, разрушения арматуры, изоляторов и даже опор воздушных линий. Неравномерность отложения льда на фазных проводах, приводящая к различным значениям стрел провеса, а также неодновременный сброс гололеда при его таянии, вызывающий «подскок» отдельных проводов, приводят к перекрытию воздушной изоляции. Гололед также является одной из причин «пляски» проводов, способной привести к их схлестыванию.

При возникновении таких аварийных ситуаций энергокомпании несут крупные убытки, связанные с восстановлением поврежденных участков ЛЭП и с недоотпуском энергии потребителям, нарушается непрерывность энергоснабжения как простых жителей, так и социально-значимых объектов и промышленных предприятий. Среднее время ликвидации гололедных аварий превышает среднее время ликвидации аварий, вызванных другими причинами, в 10 и более раз.

Кроме того, применяемые на сегодня способы и устройства для борьбы с гололедом на проводах ЛЭП отличаются относительно невысокой энергоэффективностью, необходимостью длительного отключения линии, а также не позволяют заблаговременно прогнозировать процесс гололедообразования.

Все это подчеркивает важность и актуальность задачи разработки различных способов, устройств и систем, направленных на предотвращение аварий, вызванных образованием гололеда на проводах ЛЭП. Особенно следует отметить необходимость комплексного системного подхода к проблеме – начиная с прогнозирования и мониторинга гололедной ситуации на ЛЭП, и заканчивая проведением очистки линии от уже образовавшегося льда.

Степень разработанности темы исследования. Вопросам исследования процесса гололедообразования и борьбы с гололедом на ЛЭП посвящено большое количество научных публикаций. Исследованием процесса гололедообразования и разработкой средств борьбы со льдом на проводах ЛЭП занимались как отече-

ственные ученые, такие как Бургсдорф В.В., Глухов В.Г., Банников Ю.И., Николаев Н.Я., Нейман А.А., Каганов В.И., Исмагилов Ф.Р. и др., так и зарубежные (Davidson C.C., Granger M., Farzaneh M., Leblond A., Luther M.B., Varrenti A.R., Taflove A.).

Средства борьбы с гололедом на проводах ЛЭП прошли значительный путь развития от примитивного ручного сбивания льда до первых попыток создания крупных автоматизированных систем мониторинга состояния ЛЭП в масштабах целых сетей. Сегодня во всем мире целым рядом компаний и организаций активно ведутся исследования и разработка новых способов и устройств для борьбы со льдом на линиях электропередач, повышающих надежность, эффективность и эксплуатационные характеристики существующих средств.

В настоящее время из всех имеющихся разработок самым массовым и практически единственным применяемым способом борьбы с гололедом стала плавка гололеда постоянным током большой величины. При этом затрачивается большое количество энергии и необходимо отключение линии на длительный срок (порядка 60-100 минут).

Цель работы – разработка и исследование новых способов и устройств удаления гололеда с проводов ЛЭП, обладающих повышенной надежностью и снижающих энергозатраты на очистку, а также автоматизированной системы, производящей мониторинг состояния линии, прогнозирование процесса гололедообразования и очистку проводов от образующегося льда.

Для достижения поставленной цели в работе были сформулированы и решены следующие задачи:

- 1) анализ известных исследований и разработок в области борьбы с гололедом на проводах ЛЭП;
- 2) разработка классификации средств борьбы с гололедом;
- 3) разработка нового способа удаления гололеда с улучшенными энергетическими характеристиками;
- 4) разработка ряда новых локальных устройств для удаления гололеда с проводов ЛЭП;
- 5) разработка математического описания и математической модели процессов, происходящих при удалении гололеда предложенным способом с учетом только механических факторов;
- 6) разработка математического описания и математической модели процессов, происходящих при удалении гололеда предложенным способом с учетом комбинированного воздействия;
- 7) проведение исследований на разработанных математических моделях;
- 8) разработка экспериментальной установки и проведение эксперименталь-

ного исследования предложенного способа;

9) разработка компонентов автоматизированной системы удаления гололеда;

10) исследование влияния неравномерности распределения образовавшегося льда вдоль пролета на параметры процесса его удаления.

Тематика работы соответствует следующим пунктам паспорта специальности 05.09.03:

1) Развитие общей теории электротехнических комплексов и систем, изучение системных свойств и связей, физическое, математическое, имитационное и компьютерное моделирование компонентов электротехнических комплексов и систем.

2) Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления.

3) Исследование работоспособности и качества функционирования электротехнических комплексов и систем в различных режимах, при разнообразных внешних воздействиях.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1) на основе проведенного анализа существующих способов, устройств и систем удаления гололеда разработана новая классификация средств борьбы с гололедом на проводах ЛЭП;

2) разработан новый способ удаления гололеда, основанный на комбинированном электродинамическом воздействии на ледяной покров. Предложенный способ позволит резко сократить время проведения очистки и снизить затраты энергии на очистку;

3) разработан ряд новых локальных устройств удаления гололеда, обеспечивающих повышение качества и надежности очистки проводов, для применения в случаях, когда использование массовых подходов (плавка, электродинамический способ) по тем или иным причинам невозможно;

4) разработаны математические описания и математические модели процессов, происходящих при удалении гололеда электродинамическим способом, с учетом как чисто механических факторов, так и с учетом комбинированного воздействия, и получены результаты численных экспериментов на разработанных моделях. На основании проведенного экспериментального исследования доказана адекватность разработанных моделей;

5) разработан модуль прогнозирования гололедообразования с элементами искусственного интеллекта, позволяющий определять тип образующегося при данных погодных условиях льда, интенсивность его образования и общую массу

образовавшегося льда, а также учитывающий изменяющиеся в процессе параметры линии.

Теоретическая и практическая значимость работы:

- 1) предложены и запатентованы новый способ удаления гололеда с проводов ЛЭП и ряд локальных устройств для удаления гололеда;
- 2) разработано математическое описание и математическая модель процесса колебания провода под действием периодической вынуждающей нагрузки (силы Ампера), позволяющая определять граничные сочетания параметров воздействия, при которых происходит разрушения льда, допустимую рабочую область, в которой не происходит аварийных ситуаций, а также – параметры импульсов, обеспечивающие минимум энергозатрат;
- 3) разработано математическое описание и математическая модель процесса удаления льда при применении предложенного электродинамического способа, учитывающая комбинированное (механическое и тепловое) воздействие на лед;
- 4) предложено техническое решение управляемого источника тока для реализации очистки проводов электродинамическим способом, на основании которого создана и испытана экспериментальная установка;
- 5) проработан один из вариантов общего вида структуры автоматизированной системы удаления льда с проводов ЛЭП;
- 6) разработан обобщенный алгоритм управления автоматизированной системой удаления льда с проводов ЛЭП;
- 7) на основании проведенного экспериментального исследования предложена методика учета влияния неравномерности распределения массы гололеда вдоль провода на необходимые параметры импульсов тока.

Методология и методы исследования:

Научные исследования, проведенные в рамках диссертационной работы, основывались на применении методов теории электротехники, теории дифференциальных уравнений, теории механических колебаний, аппарат нечеткой логики. При решении задач исследования использовались методы численного математического моделирования в среде Matlab и Matlab/Simulink. Экспериментальные исследования проводились на изготовленной автором экспериментальной установке.

Достоверность полученных результатов. Основные научные положения и выводы основываются на фундаментальных положениях общей теории электротехники, математики, теории колебаний, и подтверждаются соответствием результатов теоретических исследований и результатов, полученных экспериментальным путем.

Положения, выносимые на защиту:

1) новый способ удаления гололеда с проводов ЛЭП, основанный на комбинированном электродинамическом воздействии;

2) математические описания и математические модели процессов, происходящих при удалении гололеда с применением предложенного электродинамического способа;

3) техническая проработка ряда новых локальных устройств для удаления гололеда с проводов ЛЭП, основанных на различных комбинациях воздействий;

4) модуль прогнозирования гололедообразования, позволяющий определять тип образующегося льда, интенсивность образования и учитывать изменение параметров поверхности в процессе образования.

Апробация работы. Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях: IV Международный студенческий научный форум (февраль 2012 г.); Дальневосточный молодежный образовательный форум «Саха-Селигер 2012» (г. Якутск, 2012 г.); XV Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (г. Хабаровск, 2013 г.); Всероссийская заочная научно-практическая конференция «Математическое моделирование физических и информационных процессов» (г. Биробиджан, 2012 г.); Международная научно-техническая конференция «Инновационные материалы и технологии: Достижения. Проблемы. Решения.» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР – 2013» (г. Томск, 2013 г.); Международный научный интернет-симпозиум «Наука в жизни современного человека» (г. Одесса, 2013 г.); Конкурс научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых ФГБОУ ВПО «КнАГТУ» (г. Комсомольск-на-Амуре, октябрь 2013 г., апрель 2014 г., октябрь 2014 г.); Международная конференция «Современные направления теоретических и прикладных исследований - 2014» (г. Одесса, 2014 г.); Региональная научно-практическая конференция «Актуальные вопросы энергетики Дальнего Востока» (г. Южно-Сахалинск, 2014 г.); Всероссийская научно-техническая конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2014» (г. Томск, 2014 г.); II международный молодежный форум «Интеллектуальные энергосистемы» (г. Томск, 2014 г.); XVII Краевой конкурс молодых ученых и аспирантов (г. Хабаровск, 2015 г.).

Реализация работы осуществлена на базе кафедры Электропривода и автоматизации промышленных установок ФГБОУ ВО «Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет» при поддержке гранта программы У.М.Н.И.К. и стипендии Президента Российской Федерации молодым ученым и аспирантам, осуществляющим перспективные научные исследования и разработки по приоритетным направлениям модернизации российской экономики. Резуль-

таты работы в виде технической документации и методик проектирования переданы в ООО «Распределительные электрические сети», в виде программно-аппаратного модуля прогнозирования гололедообразования в МУП «Электро-сеть», а также внедрены в учебный процесс ФГБОУ ВО «КнАГТУ». О внедрении материалов работы на указанных предприятиях имеются соответствующие акты, приведенные в Приложении 7 диссертационной работы.

Публикации. По результатам работы было опубликовано 29 работ, из них 4 - в изданиях из перечня ВАК, одна монография, 10 патентов на изобретение.

Объем и структура работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав и заключения, изложенных на 164 страницах машинописного текста, списка литературы из 138 наименований и 7 приложений. В работе содержится 71 рисунок и 9 таблиц.

Автор выражает благодарность научному руководителю, заведующему кафедрой «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета, доктору технических наук, профессору Соловьеву Вячеславу Алексеевичу и главному научному сотруднику лаборатории механики деформирования Института машиноведения и металлургии ДВО РАН, доктору технических наук, профессору Козину Виктору Михайловичу за научные консультации, поддержку и помощь при работе над диссертацией.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы; сформулирована цель и основные задачи диссертационной работы; отмечены научная новизна и практическая ценность результатов исследований; изложены основные положения, выносимые на защиту, и результаты апробации работы.

В первой главе проведен анализ существующих средств борьбы с гололедом, образующимся на проводах ЛЭП, который позволил оценить энергозатратность различных средств и выявить основные факторы, препятствующие повышению эффективности процесса удаления льда.

Механические средства, обладая достаточно низкой энергозатратностью, сильно ограничены в области действия и отличаются низкой управляемостью.

Средства, основанные на тепловом воздействии, позволяют производить одновременную очистку протяженных участков линии (до 10 км). Однако, такие средства отличаются высокой энергозатратностью, длительностью воздействия, а также необходимостью отключения линии для проведения очистки.

Комбинированные средства сочетают в себе достоинства вышеперечисленных способов (позволяют производить очистку более широкой области при снижении энергетических затрат), однако требуют значительных финансовых расхо-

дов для применения и отличаются высокой сложностью технической реализации.

Изменение структуры и параметров проводов позволяет расширить допустимые диапазоны гололедно-ветровых нагрузок на линию, однако применение такого подхода сильно ограничено в связи с необходимостью полной модернизации линии и высокой стоимостью таких проводов. Кроме того, возможны ситуации, когда вследствие интенсивного гололедообразования, масса льда превышает допустимые нагрузки и требуется применение каких-либо активных способов для его удаления.

На основании проведенного анализа произведена структуризация существующих средств и разработана классификация как с точки зрения принципов разрушения, так и с точки зрения управления разрушающим воздействием. Сделан вывод об актуальности разработки энергоэффективных средств борьбы с гололедом.

Вторая глава посвящена разработке нового способа удаления гололеда с проводов ЛЭП (патент РФ № 2442256), основанного на применении электродинамического воздействия на параллельные провода, подвешенные в пролете. В качестве электродинамического воздействия предложено использовать импульсы тока с частотой, близкой к собственной частоте колебаний обледеневшего провода. Протекание импульсов тока по параллельным проводам приводит к комбинированному воздействию на лед – тепловое воздействие от протекающего по проводу тока и механические колебания, вызванные периодическим действием силы Ампера. Такой подход позволяет резко сократить временные затраты на проведение очистки, в силу того, что лед будет разрушаться преимущественно механически; снизить энергозатраты на проведение очистки; за счет теплового воздействия устранить адгезию между поверхностью провода и льдом путем расплавления тонкого слоя льда. К преимуществам предложенного способа следует отнести высокую управляемость, позволяющую изменять и подстраивать под изменяющиеся параметры линии практически все параметры воздействия: величину, частоту и скважность импульсов.

Помимо нового способа, являющегося средством для массовой очистки протяженных участков линий, предложен и разработан ряд новых локальных устройств удаления гололеда, основанных на применении комбинированного воздействия на лед.

В основу действия таких устройств (патент РФ № 2449443) положен механический принцип удаления льда посредством двух наборов вращающихся шнеков, расположенных с противоположных сторон устройства. Для повышения надежности и управляемости предложено использование при перемещении устройства вдоль провода цилиндрического линейного асинхронного двигателя,

вторичным элементом которого служит сам провод. Для предотвращения застревания устройства в неравномерном или неоднородном слое льда предусмотрен специальный поворотный механизм.

В качестве альтернативного варианта рассматривается сочетание механического, химического и теплового воздействий (патенты РФ № 2529527, 2529528, 2529530, 2529531, 2529533, 2529539, 2529546, 2529550). В предложенных решениях перемещение устройства вдоль провода осуществляется за счет реактивной тяги от сгорания ацетилена, выделяющегося при контакте льда с химическим реагентом – карбидом кальция. Разрушение ледяного покрова при этом происходит под воздействием двух факторов: тепловая энергия, выделяющаяся при горении ацетилена, и механическое разрушение специальными вращающимися фрезами, установленными в корпусе устройства.

В третьей главе разработаны математические описания и математические модели процессов, происходящих при удалении гололеда предложенным электродинамическим способом.

Для оценки границ начала разрушения гололеда, а также определения допустимых режимов работы с учетом только механических факторов было разработано математическое описание процесса колебания провода под действием периодически возникающей силы Ампера в плоскости действия вынуждающей нагрузки. При разработке модели учитывались следующие допущения:

- в силу того, что разрушение ледового покрытия связано с изменением жесткости провода, покрытого льдом, в основу модели было положено представление провода с гололедом, натянутого в пролете, в виде шарнирно опертого стержня с действующей на него периодической равномерно распределенной нагрузкой (рисунок 1);
- гололед представлен в виде полого цилиндра льда с постоянной толщиной стенки;
- основными видами разрушающего воздействия в процессе очистки при такой постановке задачи являются: изгибные напряжения и растягивающие напряжения.

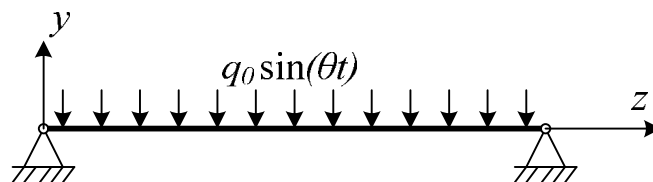


Рисунок 1 – Представление провода в виде шарнирно опертого стержня

При таком подходе уравнение, описывающее вынужденные колебания стержня может быть выражено в виде:

$$EI_x \frac{\partial^4 y(z,t)}{\partial z^4} - \frac{EF}{2l} \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial z^2} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial y(z,t)}{\partial z} \right) \frac{\partial^2}{\partial t^2} dz + r F \frac{\partial^2 y(z,t)}{\partial t^2} = q_0 \sin(qt), \quad (1)$$

где: l – длина провода в пролете, м; $y(z,t)$ – отклонение провода от положения равновесия в точке z в момент времени t , м; EF – произведение площади на модуль упругости, рассчитываемое исходя из структуры провода и толщины слоя льда; EI_x – малая изгибная жесткость провода с учетом ледяных отложений, Н*м²; rF – удельный вес провода со льдом, Н/м; q_0 – амплитудное значение действующей на провод нагрузки (максимальное значение силы Ампера), Н; q – частота вынуждающей нагрузки, рад/с.

В результате решения уравнения 1 для первой формы колебаний при представлении нагрузки в синусоидальном виде с применением метода Бубнова-Галеркина, получаем уравнение, описывающее взаимосвязь между физическими параметрами пролета ЛЭП (длина пролета, структура провода), толщиной стенки гололеда, параметрами подаваемых в линию импульсов (частота и амплитуда) и амплитудой механических колебаний провода.

$$EI_x A^3 \frac{\partial^4}{\partial t^4} + \frac{3EF}{16} A^3 \frac{\partial^4}{\partial t^4} - r F q^2 A - \frac{4q_0}{p} = 0, \quad (2)$$

где A – амплитуда механических колебаний провода, м.

При известной амплитуде и частоте колебаний можно определить величины напряжений, возникающих во льду.

Изгибное напряжение $S_{изгЛ}$, возникающее во льду равно:

$$S_{изгЛ} = \frac{32 * EI_x A^3 \frac{\partial^4}{\partial t^4} \sin^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sin(qt)}{p d^3}, \quad (3)$$

где $S_{изгЛ}$ – изгибное напряжение во льду, Н/м.

Растягивающее напряжение во льду равно:

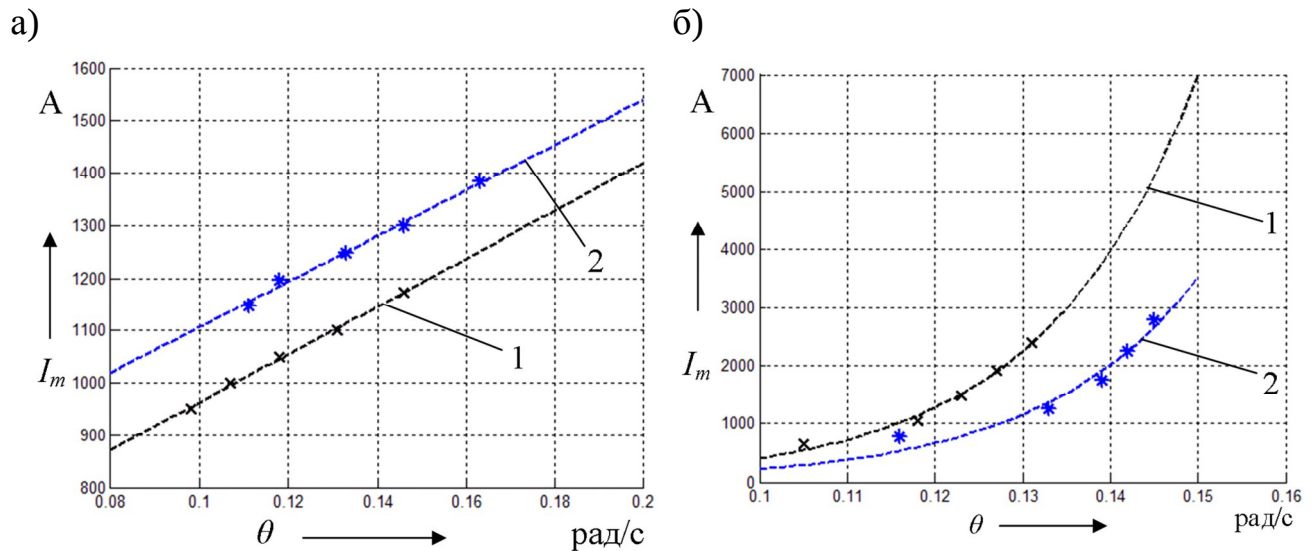
$$S_{растЛ} = \frac{EF}{4F_{л.н.}} A^2 \frac{\partial^2}{\partial t^2} \sin^2(qt), \quad (4)$$

где $S_{растЛ}$ – напряжение при растяжении во льду, Н/м; $F_{л.н.}$ – площадь поперечного сечения обледеневшего провода, м².

Для начала процесса разрушения льда необходимо, чтобы величины напряжений, возникающих во льду, превышали соответствующие пределы прочности льда.

На основании полученного математического описания была разработана математическая модель в среде Matlab, рассчитывающая зависимости амплитуд колебаний, величин изгибных и растягивающих напряжений от величины и ча-

стоты импульсов тока. По рассчитанным зависимостям и известным пределам прочности льда определяются границы начала разрушения льда, а также допустимые рабочие области. Результаты расчетов представляются в виде соответствующих графиков. На рисунке 2 приведены интегральные кривые, отражающие зависимость координат наиболее энергоэффективных параметров импульсов тока от длины пролета и от толщины льда при температурах -5°C и -10°C , полученные при проведении численного эксперимента на модели.



1 – при температуре -5°C ; 2 – при температуре -10°C

Рисунок 2 – Зависимости координат наиболее энергоэффективных параметров очистки от величин изменяемых параметров:

а – при изменении длины пролета; б – при изменении толщины слоя льда

Проведенные численные эксперименты позволили выявить связь необходимых параметров электродинамического воздействия с основными параметрами ЛЭП. Все требуемые параметры, рассчитанные при проведении численного эксперимента, лежат в допустимой рабочей области.

Учет всех составляющих комбинированного воздействия на лед в процессе очистки с применением предложенного электродинамического способа обусловил необходимость разработки математического описания, основанного на условном представлении процесса удаления гололеда состоящим из трех независимых подпроцессов: процесса расплавления тонкого внутреннего слоя ледяного покрытия, обеспечивающего резкое снижение адгезионных свойств контакта «провод-лед»; процесса разлома ледяного цилиндра на составляющие за счет изгибных деформаций; процесса стряхивания элементов расколотого ледяного цилиндра с провода за счет инерционных сил.

При разработке математического описания подпроцесса расплавления внутреннего слоя ледяного покрытия считалось что: плотность ледяного покрова од-

нородна и структура льда одинакова; токопроводящий многопроволочный кабель в сечении представляет собой идеальный круг и не имеет антиадгезионного покрытия; температура ледяного покрова совпадает с температурой кабеля; теплоемкость несущей стальной жилы принимается равной теплоемкости алюминиевого провода.

При таких допущениях энергия, необходимая для создания водяной прослойки, может быть определена как:

$$W_{в.п} = W_{н.к} + W_{л} + W_{т.об}, \quad (5)$$

где $W_{н.к}$ – энергия, затраченная на нагрев токопроводящего кабеля, Дж; $W_{л}$ – энергия, необходимая для перевода массы льда в другое агрегатное состояние, Дж; $W_{т.об}$ – энергия, рассеиваемая в процессе теплообмена с атмосферой, Дж.

В тоже время, энергия, необходимая для нагрева токоведущего кабеля и расплава льда, формируется за счет протекания по кабелю импульсов тока, скважность которых при фиксированной величине импульсов I_m , определяется как:

$$g = \frac{c_k m_k (t_{кон} - t_{исх}) + m_{л} (q_{пл.льда} - c_{л} t_{исх} + c_{в} t_{кон}) + 2\pi l_{тепл} \frac{t_{кон} - t_{исх}}{\ln \frac{d + 2b}{d}} t_{пл}}{R_{эл} t_{пл} I_m^2}, \quad (6)$$

где $g = t_u / T$ – скважность импульсов; c_k , $c_{л}$, $c_{в}$ – удельные теплоемкости провода, льда и воды соответственно, Дж/(кг*К); $q_{пл.льда}$ – удельная теплота плавления льда, Дж/кг; $t_{кон}$, $t_{исх}$ – конечная и начальная температуры льда соответственно, °С; m_k – масса провода в пролете, кг; $m_{л}$ – масса расплавляемой прослойки льда, кг; $R_{эл}$ – сопротивление провода, Ом; $t_{пл}$ – целевое время расплавления прослойки льда, с; I_m – амплитуда импульсов тока, А; $l_{тепл}$ – коэффициент теплопроводности льда, Вт/(м*К).

При описании подпроцесса разлома ледяной цилиндр был представлен в виде квадратного сечения, у которого изгибу подвержены пластины расположенные в верхней и нижней плоскостях цилиндра, а боковые – испытывают только сжатие и растяжение.

При этом изгибающий момент ледяного цилиндра будет равен:

$$M_{л.ц} \gg r_{л} * g * h * l_{л.ц}^2, \quad (7)$$

где $l_{л.ц}$ – длина пластины разламываемого цилиндра, м; h – толщина ледяного покрова, м; g – ускорение свободного падения, м/сек²; $l_{см}$ – полудлина волны статического прогиба ледяной, м; $r_{л}$ – плотность льда, кг/м³.

При известном предельном значении изгибающего момента можно определить длину пластины разламываемого цилиндра $l_{л.ц}$ (8), значение которой можно выразить через параметры электродинамического воздействия.

$$l_{л.ц} = \sqrt{\frac{s_{изг.пр} h}{6gr_{л}}}, \quad (8)$$

где $s_{изг.пр}$ – предел прочности льда на изгиб, Н/м².

Таким образом, при известных параметрах колебаний можно определить длину фрагментов разламываемого ледяного цилиндра и найти массу льда, подлежащего стряхиванию.

При разработке математического описания подпроцесса стряхивания колебания провода считаются синусоидальными, смещение материальной точки участка провода определяется как:

$$x = A * \cos(\omega t + j), \quad (9)$$

где A – амплитуда колебаний материальной точки участка провода, м; ω – частота колебаний провода, рад/с; j – фазовый сдвиг колебаний, рад.

Силу, действующую на колеблющийся участок провода (материальную точку), можно найти по формуле:

$$F_{\epsilon} = (m_{ф.к} + m_{ф.льда}) A \omega^2 * \cos(\omega t + j + p), \quad (10)$$

где $m_{ф.льда}$ – масса фрагмента льда, на который действует сила, кг; $m_{ф.к}$ – масса фрагмента провода, на котором расположен фрагмент льда, кг.

Отрыв ледяного куска будет наблюдаться при условии, что F_{ϵ} будет превышать вес этого куска, который может быть рассчитан по формуле:

$$P = g * r_{л} * l * \rho * b(d + b). \quad (11)$$

Представленное математическое описание физических процессов удаления гололеда с проводов ЛЭП позволило создать математическую модель процесса разрушения гололедных образований на проводах ЛЭП с учетом комбинированного воздействия в среде Matlab/Simulink. Результаты, полученные при проведении серии численных экспериментов на модели, приведены в виде набора поверхностей на рисунке 3. На рисунке 3 а приведено семейство поверхностей, отражающих зависимость требуемой скважности импульсов от величины импульсов и толщины расплавляемого слоя льда при различных величинах температуры воздуха. На рисунке 3 б показана поверхность, отражающая зависимость длины отламываемого фрагмента ледяного цилиндра от толщины ледяного покрова h и величины подаваемых в линию импульсов. Кроме того, разработанная модель позволяет оценить затраты энергии на очистку электродинамическим способом. В результате расчетов на модели выявлено, что предложенный электродинамиче-

ский способ эффективнее стандартной плавки гололеда (экономия энергии составляет от 14,75 % до 83,5 %). С ростом толщины стенки льда его эффективность падает, в то время как стоимость и сложность оборудования для генерации импульсов требуемой величины резко возрастает. Это еще раз подтверждает необходимость своевременного определения момента начала гололедообразования и максимально быстрого начала проведения мероприятий по борьбе с гололедом при его обнаружении.

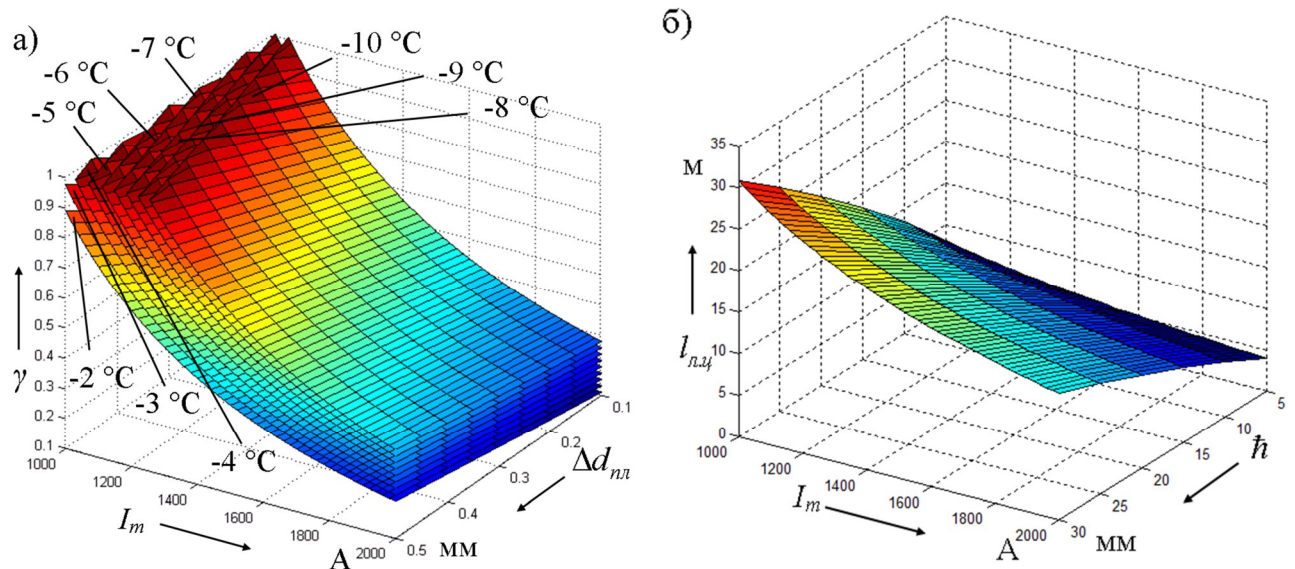


Рисунок 3 – Результаты численных экспериментов на модели удаления гололеда с учетом комбинированного воздействия:

а – семейство поверхностей зависимости требуемой скважности импульсов от толщины расплавляемого льда и величины импульсов при различных температурах; б – зависимость длины пластины разламываемого цилиндра $l_{л.ц}$ от толщины ледяного покрова h и величины подаваемых в линию импульсов

Четвертая глава посвящена разработке прогнозирующего модуля для автоматизированной системы удаления гололеда с проводов ЛЭП. Математическое описание, разработанное в данной главе, ориентировано на термодинамический подход, предложенный Д.Е. Титовым. Подход заключается в следующем:

В основу разработки математической модели положен учет основных параметров, участвующих в процессе гололедообразования (температура воздуха, температура провода и относительная влажность воздуха).

На основании вышеуказанных параметров определяется значение точки росы q_a и точки десублимации q_i . По соотношению величин всех трех температур (температуры провода, точки росы и точки десублимации) определяется факт наличия процесса образования гололеда. Затем, с учетом экспериментально определенного пропорционального коэффициента, определяется интенсивность гололедообразования. В тоже время, интенсивность гололедообразования и конечная

масса образующегося льда зависят от типа образующегося в текущих условиях льда (то есть от его плотности) и от геометрических размеров поверхности, на которой образуется лед.

Для определения типа образующегося льда была построена семантическая сеть, отражающая функциональные связи между основными факторами, влияющими на процесс гололедообразования и типами образующегося льда. На основании полученной семантической сети был разработан нечеткий прогнозирующий модуль в среде Matlab с применением нечеткого логического вывода Мамдани. Все разнообразие возможных типов образующегося гололеда при разработке прогнозирующего модуля было ограничено тремя наиболее распространенными основными типами – монолитный лед (плотность 900 кг/м^3), изморозь (плотность 50 кг/м^3), мокрый снег и сложные смеси (плотность 500 кг/м^3).

При расчете площади поверхности, на которой образуется лед, провод был представлен в виде цилиндра диаметром d , а намерзающий на нем гололед – в виде полого цилиндра с толщиной стенки b . Считается, что в момент времени t на проводе имеется слой льда с толщиной стенки $b(t)$ (момент начала гололедообразования считается моментом $t = 0$). С учетом роста толщины стенки ледяного цилиндра в процессе образования льда, площадь поверхности, на которой образуется гололед, на одном проводе в полете составит:

$$S_{нов}(t) = l * p * \sqrt{\frac{4}{p} * \frac{m(t)}{r_l * l} + d^2}, \quad (12)$$

где $S_{нов}(t)$ – площадь поверхности в момент времени t , м^2 ; r_l – плотность образующегося льда, кг/м^3 ;

Полученное математическое описание изменения геометрических параметров поверхности гололедообразования было использовано при разработке описанного нечеткого прогнози-

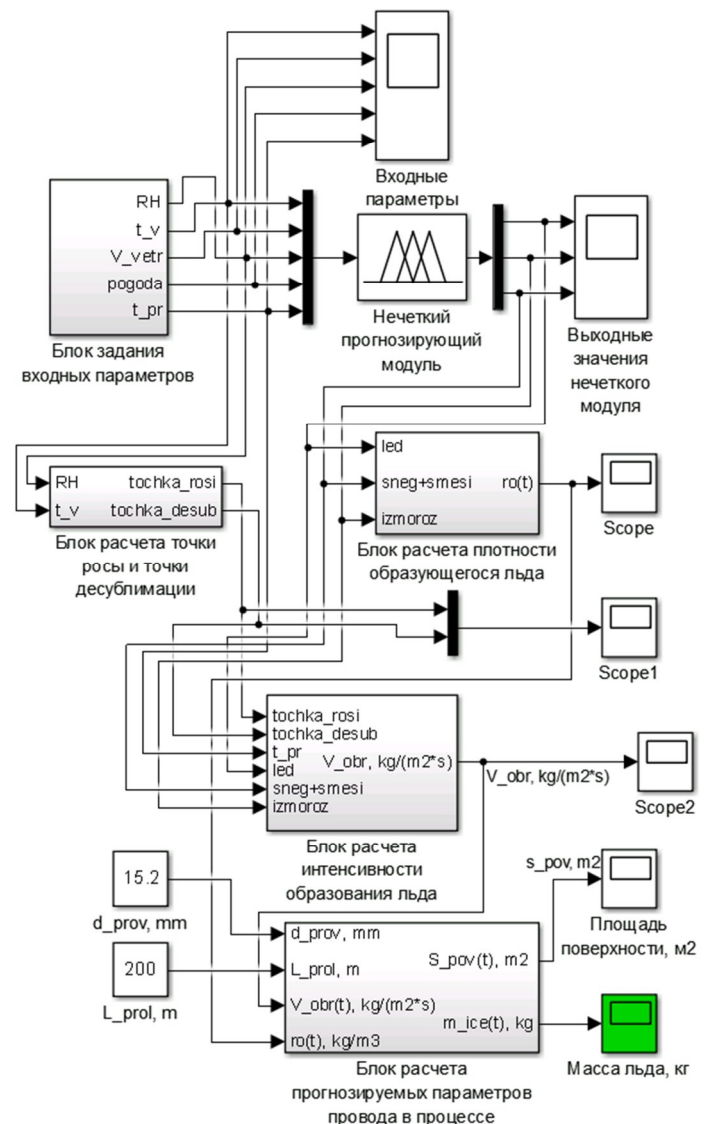


Рисунок 4 – Структура системы прогнозирования на основе нечеткого прогнозирующего модуля

рующего модуля. Разработанный нечеткий прогнозирующий модуль работает в составе системы, представленной на рисунке 4.

Помимо математического описания процесса гололедообразования с учетом типа образующегося льда и изменения геометрических параметров поверхности, в четвертой главе был проработан один из вариантов общего вида структуры автоматизированной системы удаления льда с проводов ЛЭП. С учетом описанной структуры был разработан обобщенный алгоритм управления автоматизированной системой удаления льда с проводов ЛЭП.



Рисунок 5 – Управляемый источник тока для экспериментальной установки и экспериментальная установка

В пятой главе произведена разработка экспериментальной установки для исследования предложенного электродинамического способа удаления гололеда, состоящей из физического макета ЛЭП в масштабе 1:40 и управляемого источника тока (рисунок 5), выполнено экспериментальное исследование предложенного способа, проведена обработка и сравнение результатов эксперимента с теоретическими результатами, полученными на математических моделях.

Управляемый источник построен из двух частей – логической, выполненной на программируемом микроконтроллере AtMega 32A, и силовой, выполненной в виде однофазного моста на силовых IGBT-транзисторах для генерации как однополярных, так и двухполярных импульсов тока различной частоты и скважности. Для получения сигналов обратных связей используются датчики тока и напряжения, установленные на выходе источника. Микроконтроллер обеспечивает: управление работой устройства; генерацию управляющих сигналов для открытия и закрытия ключей силовой части источника; аналого-цифровое преобразование и обработку сигналов с датчиков обратных связей; связь с внешним компьютером через преобразователь интерфейсов.

В ходе проведения эксперимента однополярные и двухполярные импульсы тока различ-

ной частоты и скважности от управляемого источника тока подавались на провода макета ЛЭП. Под действием периодически возникающей силы Ампера провода совершали механические колебания, амплитуда которых фиксировалась с помощью мерной линейки на видеокамеру. Всего было исследовано четыре случая: при отсутствии гололеда, при наличии равномерно распределенного слоя льда и две различные схемы неравномерного распределения льда вдоль провода.

Обработка экспериментальных данных и их сравнение с теоретическими результатами позволили подтвердить адекватность разработанных в третьей главе математических моделей, а также разработать методику учета неравномерности распределения льда вдоль провода при расчете требуемых параметров подаваемых в линию импульсов. В ходе сравнения расхождение экспериментальных данных и результатов моделирования не превышало 13 %.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате теоретических и экспериментальных исследований, проведенных в данной работе, можно сделать следующие выводы:

1) На основании проведенного анализа существующих средств борьбы с гололедом выявлены основные принципы и подходы удаления гололеда с проводов ЛЭП. Произведена структуризация существующих средств и разработана классификация как с точки зрения принципов разрушения, так и с точки зрения управления разрушающим воздействием.

2) Критический анализ известных решений в области борьбы с гололедом позволил выявить факторы, препятствующие повышению эффективности процесса удаления гололеда, и признать актуальной задачу разработки и создания энергоэффективных средств борьбы с гололедом.

3) Для снижения влияния выявленных в первой главе недостатков существующих средств борьбы с гололедом на проводах ЛЭП был предложен и разработан новый способ удаления гололеда на проводах ЛЭП, использующий комбинированное электродинамическое воздействие. Реализация данного способа позволит снизить энергозатраты на проведение очистки проводов и сократить время проведения очистки.

4) Предложено и запатентовано новое локальное электромеханическое устройство, обеспечивающее повышение качества очистки проводов на отдельных участках ЛЭП при снижении энергетических затрат на очистку. Предложенное устройство обладает повышенной надежностью и управляемостью по сравнению с существующими аналогами, а также не требует отключения потребителей на время проведения очистки. С целью снижения затрат энергии и упрощения конструкции локальных устройств выполнен и запатентован ряд разработок по усовершенствованию конструкции локальных химико-механических устройств.

Практическая реализация указанных устройств позволит расширить область использования локальных устройств для различных климатических условий и параметров гололедообразования.

5) Для исследования предложенного электродинамического способа разработано математическое описание и математическая модель колебаний провода под действием периодической силы Ампера в плоскости действия вынуждающей нагрузки, позволяющая рассчитывать величины амплитуды колебаний провода, величины изгибных и растягивающих напряжений, возникающих во льду. Результаты расчетов на полученной модели позволяют оценить требуемые параметры импульсов тока и границы применимости предложенного электродинамического способа. Проведен численный эксперимент на разработанной модели, позволивший определить границы начала процесса разрушения гололеда, требуемые параметры импульсов тока и допустимую область изменения этих параметров.

6) Разработано математическое описание и математическая модель процесса удаления льда при использовании предложенного электродинамического способа, учитывающая не только механические, но и тепловые факторы, воздействующие на лед. Модель позволяет определять параметры импульсов тока, необходимые для надежного расплавления тонкого слоя льда на границе «провод-лед», а также длины отламываемых фрагментов ледяного цилиндра в процессе разрушения.

7) Разработано математическое описание процесса гололедообразования на основе термодинамического способа мониторинга состояния линии, позволяющее помимо изменения параметров окружающей среды производить учет изменяющихся параметров поверхности, на которой происходит образование ледяных отложений; Для отражения функциональных взаимосвязей между основными факторами, влияющими на процесс гололедообразования, и типами образующегося льда разработана семантическая сеть, позволяющая учитывать не только количественные факторы (температура воздуха и т.д.), но и качественные величины.

8) Разработан прогнозирующий модуль с элементами искусственного интеллекта на основе аппарата нечеткой логики, учитывающий изменение структуры и типа образующегося на проводах льда при изменении параметров окружающей среды.

9) Разработан обобщенный алгоритм управления автоматизированной системой удаления льда с проводов ЛЭП.

10) Проведено экспериментальное исследование предложенного электродинамического способа удаления гололеда с проводов ЛЭП на физическом макете ЛЭП с применением управляемого источника тока с изменением как параметров объекта, так и параметров возмущающего воздействия. Результаты проведенного

экспериментального исследования доказали адекватность теоретических расчетов, полученных на математических моделях.

11) Экспериментальное исследование по учету влияния неравномерности распределения массы льда вдоль провода еще раз подтвердило необходимость использования устройств для удаления гололеда с проводов ЛЭП в составе автоматизированных систем с наличием обратных связей. Предложена методика учета влияния неравномерности распределения массы гололеда вдоль провода на необходимые параметры импульсов тока.

Работы, опубликованные по теме диссертации:

Публикации в рецензируемых научных журналах и изданиях

1. Сухоруков, С.И. Управляемый источник тока для экспериментальной установки по удалению льда с проводов ЛЭП / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев // Электротехнические комплексы и системы управления. – Воронеж, 2013. № 4. – С. 6-10.

2. Сухоруков, С.И. К оценке возможностей удаления льда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, К.Е. Костин // Информатика и системы управления № 3, 2014 – Благовещенск, 2014 – С. 148-158.

3. Сухоруков, С.И. Разработка интеллектуального модуля прогнозирования образования гололеда на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный, Д.О. Савельев, К.Е. Костин // Ученые записки КнАГТУ – Комсомольск-на-Амуре, 2015. № 3. – С. 18-25.

4. Сухоруков, С.И. Математическая модель процесса разрушения ледяного покрова на проводах линий электропередачи электродинамическим способом / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, Б.Я. Мокрицкий // Электричество – Москва, 2016. № 7. с. 61-65.

5. Пат. 2442256 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Малых К.С. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «АмГПГУ» – № 2010144485/07; заявл. 29.10.2010; опубл. 10.02.2012, Бюл. № 4 ; 4 с. : ил.

6. Пат. 2449443 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления льда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Орлов Д.А., Сухоруков С.И. ; заявитель и патентообладатель ФГОУ ВПО «АмГПГУ», ГОУ ВПО «КнАГТУ» – № 2011106260/07; заявл. 17.02.2011 ; опубл. 27.04.2012, Бюл. № 12 ; 7 с. : 1 ил.

7. Пат. 2529527 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев

В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» – № 2013121197/07; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 10 с. : 4 ил.

8. Пат. 2529528 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» – № 2013121260/07; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 10 с. : 4 ил.

9. Пат. 2529530 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» – № 2013121261/07; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 10 с. : 4 ил.

10. Пат. 2529531 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» – № 2013121263/07; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 10 с. : 4 ил.

11. Пат. 2529533 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» – № 2013121265/07; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 10 с. : 4 ил.

12. Пат. 2529539 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-

Алейхема» – № 2013122518/07; заявл. 15.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 14 с. : 9 ил.

13. Пат. 2529546 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» – № 2013121255/07; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 10 с. : 4 ил.

14. Пат. 2529550 С1 Российская Федерация, МПК Н 02 G 7/16. Устройство для удаления гололеда с провода линии электропередач / Козин В.М., Соловьев В.А., Земляк В.Л., Гринкруг Л.С., Верещагин В.Ю., Анисимов А.Н., Орлов Д.А., Сухоруков С.И., Чижиумов С.Д. ; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», ФГБУН «ИМиМ ДВО РАН», ФГОУ ВПО «ПГУ им. Шолом-Алейхема» – № 2013121194/07; заявл. 07.05.2013 ; опубл. 27.09.2014, Бюл. № 27 ; 10 с. : 4 ил.

Публикации в других изданиях:

15. Сухоруков, С.И. Разработка энергоэффективного устройства удаления ледяных образований с проводов ЛЭП / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, В.М. Козин, Д.А. Орлов // Электронное научное издание "Ученые заметки ТОГУ". – Хабаровск, 2012, Том 3, № 1, С. 107 – 110.

16. Сухоруков, С.И. Способ удаления гололеда с проводов ЛЭП / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, В.М. Козин, Д.А. Орлов // Успехи современного естествознания. №6, 2012 – Москва, 2012 – С. 54-56.

17. Сухоруков, С.И. Математическая модель вынужденных колебаний провода ЛЭП в плоскости действия периодической нагрузки / С.И. Сухоруков // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XV краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 17-24 января 2013 г.: в 2 т. Т. 2 : Науки о жизни и Земле. Физика, математика, информационные технологии. Технические науки, медицинские технологии – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2013. – С. 221-225.

18. Сухоруков, С.И. К вопросу разработки математической модели вынужденных колебаний обледеневшего провода под действием периодически возникающей силы Ампера / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, В.М. Козин, Д.А. Орлов // Математическое моделирование физических и информационных процессов: сборник материалов Всероссийской заочной научно-практической конференции, Биробиджан, 25 декабря 2012 г. – Биробиджан, 2013. – С. 77-82.

19. Сухоруков, С.И. Инновационные технологии управления / С.И. Сухоруков,

руков, В.А. Соловьев, В.М. Козин, С.П. Черный // Инновационные технологии управления. В 2 книгах. К 1. – Одесса, 2013.

20. Сухоруков, С.И. Математическое моделирование колебаний провода под действием силы Ампера / С.И. Сухоруков, Д.А. Орлов // Научная сессия ТУСУР-2013: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 15-17 мая 2013 г. – Томск, 2013, В 5 ч. Ч. 3. – С. 200-203.

21. Сухоруков, С.И. Способ удаления гололеда с проводов контактных сетей и линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, В.М. Козин, Д.А. Орлов // Прикладные задачи механики деформируемого твердого тела и прогрессивные технологии в машиностроении: сб. ст. – Вып. 4. – Комсомольск-на-Амуре: ИМИМ ДВО РАН, 2013. – С. 126-137.

22. Сухоруков, С.И. Разработка автоматизированной системы удаления гололеда с проводов ЛЭП / С.И. Сухоруков // Наука молодых – основа будущего России: материалы докладов конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2013 г.). – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КнАГТУ», 2013. – С. 101-116.

23. Сухоруков, С.И. К вопросу эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный, К.Е. Костин // Сборник научных трудов SWORLD – Выпуск 1. Том 2. – Одесса: Куприенко СВ, 2014 – С. 31-35.

24. Сухоруков, С.И. К вопросу экспериментального исследования эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков // Научная сессия ТУСУР-2014: Материалы Всероссийской научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых, Томск, 14-16 мая 2014 г. – Томск: В-Спектр, 2014: В 5 ч. Ч. 3. – С. 157-159.

25. Сухоруков, С.И. Об эффективности борьбы с гололедными образованиями на проводах линий электропередач / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный // Электротехнические системы и комплексы № 1, 2014 – Магнитогорск, 2014 - С. 14-17.

26. Сухоруков, С.И. К вопросу определения текущей частоты импульсов при удалении гололеда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, С.П. Черный, Д.О. Савельев // Электротехника: сетевой электронный научный журнал. – Магнитогорск, 2014. № 2, Том 1. – С. 10-13.

27. Сухоруков, С.И. Physical basis of power transmission wire's deicing by electrodynamic method / С.И. Сухоруков, В.А. Соловьев, В.М. Козин, Д.Ю. Ляпунов // MATEC Web of Conferences: The 2nd International Youth Forum “Smart Grids”

– Volume 19, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/matecconf/20141901031>.

28. Сухоруков, С.И. Разработка автоматизированной системы удаления гололеда с проводов ЛЭП электродинамическим способом / С.И. Сухоруков // Наука молодых – основа будущего России: материалы докладов конкурса научно-исследовательских работ аспирантов и молодых ученых «Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета» (г. Комсомольск-на-Амуре, 2014 г.) / редкол.: Э.А. Дмитриев (отв. ред.) и др. – Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО «КНАГТУ», 2014. – с. 53-67.

29. Сухоруков, С.И. Разработка интеллектуальной системы борьбы с гололедом на проводах ЛЭП / С.И. Сухоруков // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XVII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 15-23 января 2015 г. – Хабаровск : Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2015. – С. 249-253.

Личный вклад автора в работах, написанных в соавторстве, заключается в следующем: обзор и анализ существующих способов, устройств и систем для удаления гололеда с проводов ЛЭП [19]; разработка нового способа удаления гололеда с проводов ЛЭП [5, 16, 21]; разработка нового локального электромеханического устройства удаления гололеда с проводов ЛЭП [6]; разработка ряда локальных химико-механических устройств удаления гололеда с проводов ЛЭП [7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14]; разработка математической модели колебаний провода под действием периодически возникающей силы Ампера [18, 20]; разработка математической модели процесса удаления гололеда электродинамическим способом при учете комбинированного воздействия [4, 27]; разработка и создание управляемого источника тока для экспериментальной установки по исследованию процесса удаления гололеда [1, 15]; проведение экспериментального исследования процесса удаления гололеда электродинамическим способом [2, 23, 25]; разработка методики учета неравномерности распределения гололеда вдоль пролета ЛЭП [26]; разработка интеллектуального модуля прогнозирования гололедообразования на основе аппарата нечеткой логики [3].