



На правах рукописи

Ратушняк Валентина Сергеевна

**ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ
ГОЛОЛЕДОБРАЗОВАНИЯ НА ОСНОВЕ
ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ**

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Иркутск 2021 г.

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

- Научный руководитель:** **Лившиц Александр Валерьевич**
доктор технических наук, профессор
- Официальные оппоненты:** **Угаров Геннадий Григорьевич**
доктор технических наук, профессор,
Камышинский технологический институт (филиал) Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный технический университет» (г. Камышин), кафедра «Электроснабжение промышленных предприятий», профессор.
- Бронов Сергей Александрович**
доктор технических наук, доцент,
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет» (г. Красноярск), кафедра Вычислительной техники, профессор.
- Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Казанский государственный энергетический университет», г. Казань.

Защита диссертации состоится «11» ноября 2021 года в 10:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.04 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru

Автореферат разослан «___» сентября 2021 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
канд. техн. наук, доцент



Максим Александрович Дыбко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы диссертационного исследования. Воздушные линии электропередачи (ЛЭП) повсеместно используются для передачи и распределения электроэнергии. Только в России общая протяженность ЛЭП составляет около 3 млн. км. и охватывает все регионы страны. Нормальный ход производственных процессов в значительной степени зависит от бесперебойности энергоснабжения как одной из характеристик качества электроэнергии. При этом одним из факторов массовых нарушений электроснабжения потребителей выступает воздействие экстремальных погодных явлений.

В межсезонье, когда температура воздуха колеблется около нуля, могут возникать погодные условия, способствующие обледенению проводов, налипанию мокрого снега. При сильной интенсивности обледенения масса проводов в полете может за нескольких часов увеличиться в 3-4 и более раз. В результате возрастают весовые и аэродинамические нагрузки на элементы конструкции ЛЭП. Изменение профиля проводов из-за обледенения приводит к их раскачиванию под воздействием ветра, так называемой пляске. В результате возрастает риск разрушения проводов, опор, изоляторов, что приводит к отключению энергопотребителей, дорогостоящему ремонту линии.

Прогрессирующая статистика случаев опасных гидрометеорологических явлений указывает на рост затрат электросетевых компаний на борьбу с гололедом при увеличивающейся протяженности ЛЭП. Проблема актуальна не только в России, но и за рубежом: в Канаде, Европе, Китае. Для борьбы с обледенением преимущественно практикуется тепловой способ. Это решение обладает такими недостатками, как необходимость отключения энергопотребителей, значительные затраты электроэнергии на проведение антигололедных мероприятий, риск отжига проводов, необходимость доставки оборудования на место проведения антигололедных мероприятий. С учетом продолжительности гололедоопасной обстановки от нескольких часов до нескольких суток в сочетании с возможностью сильной интенсивности обледенения, эффективность применяемых методов борьбы значительно снижается.

Степень разработанности темы исследования. Исследованием процесса гололедообразования и разработкой решений для предотвращения гололедных аварий в различных аспектах занимались такие ученые как Банников Ю. И., Богородский В. В., Бургсдорф В. В., Гольдштейн Р. В., Дьяков А. Ф., Епифанов В. П., Засыпкин А. С., Коржавин К. Н., Козин В. М., Левченко И. И., Минуллин Р. Г., Соловьев В. А., Farzaneh M., Jamaledine A., Ji K., Kalman T., McClure G. и другие. На сегодняшний день предложено большое количество средств и методов, а также устройств и изобретений, направленных на решение проблемы обледенения проводов ЛЭП. Только способам удаления льда посвящено более 170 патентов российских и мировых изобретений, среди которых наиболее перспективными с точки зрения энергоэффективности считаются ударные и вибрационные методы. Исследованию и разработке приводов ударного действия посвящены работы Болюха В.Ф., Бондалетова В.Н., Нейман В.Ю., Ряшенцева Н.П., Стародубова В.А., Татмышевского К.В., Тютюкина В.А., Усанова К.В. Разработкой способов удаления наледи с проводов ЛЭП ударным или вибрационным методом с применением различных исполнительных устройств занимались ученые Белый Д.М., Ефимов А.В., Козин В.М., Левин И.А., Иванов Е.И., Egbert R.I., Laforte J.L., Landry M., Leblond A. и другие. Однако до сих пор остается нерешенным вопрос о выборе исполнительного механизма и принципа его действия.

Дальнейшее развитие идей борьбы с проблемой обледенения проводов ЛЭП лежит в области разработки способа предупреждения гололедообразования ударным или вибрационным методом. Поскольку для обеспечения безопасности ЛЭП недостаточно знать ее текущее состояние, а приступать к удалению льда, когда ледяная корка уже превышает несколько миллиметров. Эффективнее не допускать образования льда, принимая предупреждающие меры при наступлении первых признаков гололедоопасной обстановки. Таким образом, актуальной задачей является разработка устройства для предупреждения обледенения проводов ЛЭП.

Цель диссертационного исследования заключается в повышении энергоэффективности борьбы с обледенением проводов ЛЭП посредством предотвращения гололедных аварий ударным методом с применением электромеханического преобразователя в качестве исполнительного механизма.

Для реализации цели работы потребовалось решить следующие **задачи**:

1. Проанализировать основные методы и средства, используемые для недопущения гололедных аварий и сформулировать критерии эффективности решения для борьбы с обледенением проводов ЛЭП.

2. Обосновать выбор исполнительного механизма и наиболее предпочтительный вариант схемного решения устройства, определить способы снижения токовых нагрузок.

3. Разработать необходимые численные и аналитические модели для исследования электрических параметров устройства, реакции провода и присоединённой массы на удар. Обосновать реализуемость предупреждения гололедообразования на ЛЭП путем удаления капель воды до их замерзания ударным методом.

4. Разработать методику проектирования устройства предупреждения образования льда. Провести испытания спроектированной экспериментальной установки с использованием прямых измерений в качестве методов верификации.

Объект исследования: воздушные линии электропередачи 110 кВ.

Предмет исследования: предупреждение обледенения проводов ЛЭП ударным методом.

Научная новизна диссертационной работы заключается в следующем:

1. Разработана аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в линейном импульсно-индукционном электромеханическом преобразователе (ЛИИЭП) устройства для предупреждения гололеда, прикрепленного к проводам и движущегося в горизонтальном или вертикальном направлении.

2. Впервые разработана динамическая модель устройства, основанная на предположении о мгновенном отделении элементов индукторной системы (ИС) и отсутствии дальнейшего электромагнитного взаимовлияния.

3. Разработана численная модель системы, включающей в себя провода, присоединенные массы (капли воды) и устройство для предупреждения образования наледи.

4. Впервые сформированы закономерности влияния электрических и массогабаритных параметров устройства на токовые нагрузки в цепи индуктора, импульс силы точечного удара, амплитуду отклонения провода и ускорение, с которым движется присоединенная масса.

5. Предложена методика проектирования устройства для определения электрических и массогабаритных параметров устройства, обеспечивающего оптимальное воздействие для предупреждения гололедообразования.

Теоретическая значимость работы: обоснован ударный способ, схемное решение и исполнительный механизм для предупреждения гололедообразования на проводах ЛЭП; разработаны модели электродинамического взаимодействия ИС, провода ЛЭП и присоединенной массы (капли воды); получены закономерности влияния электрических и массогабаритных параметров устройства на токовые нагрузки в цепи индуктора, импульс силы точечного удара, амплитуду отклонения провода и ускорение, с которым движется присоединенная масса на конце пролета.

Практическая значимость работы: полученные результаты исследования применены для разработки методики проектирования устройства предупреждения гололедообразования на проводах ЛЭП, способствующего снижению аварийности, обрывов проводов в гололедоопасных районах; изготовлены макет ЛЭП, экспериментальная установка и измерительная система для регистрации колебаний в двух точках провода одновременно; проведены лабораторные эксперименты с использованием изготовленного оборудования.

Методы исследования. Теоретические методы математического анализа и математической физики, метод моделирования динамического поведения многотельных конструкций с целью прогнозирования кинематических и динамических характеристик проектируемого изделия в среде MSC.Adams. Экспериментальные методы: натурного прототипирования, стендовых испытаний.

На защиту выносятся следующие положения:

1. Разработанная аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП устройства для предупреждения гололедообразования, отличающаяся учетом подвижности ИС, а также сил сопротивления ее движению (присоединяемой массы провода, силы тяжести, силы упругости возвратной пружины, трения бойка/индуктора о корпус устройства, силы сопротивления провода), обеспечивает расчет токовых нагрузок в цепи индуктора и координат перемещения ИС, прикрепленной к проводам и движущейся в горизонтальном или вертикальном направлении.

2. Впервые разработанная динамическая модель устройства при боковом и нижнем способах крепления, основанная на предположении о мгновенном отделении элементов ИС и отсутствии дальнейшего электромагнитного взаимодействия, обеспечивает качественную оценку влияния параметров устройства на перемещение ИС и используется для оценки принимаемых решений при проектировании устройства для предупреждения гололеда.

3. Разработанная численная модель системы, включающей в себя провода ЛЭП, присоединенные капли воды и устройство для предупреждения образования наледи, отличающаяся расчетом реакции присоединенной капли воды на точечный удар телом конечной массы с учетом возвратного движения ударяющего тела, позволяет производить расчет движения провода и отделения капель.

4. Впервые полученные закономерности влияния электрических и массогабаритных параметров устройства на токовые нагрузки в цепи индуктора, импульс силы точечного удара, амплитуду отклонения провода и ускорение, с которым движется присоединенная масса с учетом направления приложения нагрузки и возвратного движения ударяющего тела, обеспечивает формирование критериев оценки принимаемых решений при поиске оптимальных параметров удара, который необходимо генерировать устройству применительно к произвольному пролету.

5. Разработанная методика проектирования устройства, отличающаяся расчетом оптимального воздействия для предупреждения образования наледи ударным методом и параметров устройства для его реализации по критериям минимальной амплитуды силы тока, силы инерции и массы, обеспечивает параметрический синтез устройства на основе входных параметров пролета и присоединенной массы (капли воды).

Достоверность полученных научных результатов подтверждается обоснованностью принятых допущений и адекватностью используемых при исследовании численных и аналитических моделей; непротиворечивостью экспериментальных результатов, выводов и моделей известным теоретическим положениям и результатам предыдущих исследований; сходимостью результатов при сопоставлении теоретических расчетов и численного моделирования с результатами исследований физических моделей (расхождение в пределах 3-6 %).

Реализация результатов работы Результаты, полученные в диссертационной работе, используются для проектирования устройства предупреждения образования льда в ООО «РСК сети».

Выполненные в диссертационной работе исследования, касающиеся расчетных и математических моделей, результаты теоретических и экспериментальных исследований, численные результаты и их интерпретация, а также созданная физическая модель, внедрены в учебный процесс кафедры «Системы обеспечения движения поездов» ФГБОУ ВО «КрИЖТ ИрГУПС».

Работа выполнена при поддержке РФФИ по результатам конкурсного отбора научных проектов в Конкурсе на лучшие проекты фундаментальных научных исследований, выполняемые молодыми учеными, обучающимися в аспирантуре («Аспиранты»), научный проект №19-38-90188 «Формирование научных основ и принципов управления процессами очистки проводов ЛЭП от гололедных отложений короткими механическими ударами».

Личный вклад автора заключается в выполнении основного объема исследований, изложенных в диссертационной работе; в разработке основных теоретических положений, методик, алгоритмов, математических моделей; в непосредственном участии в разработке экспериментальной установки, измерительной системы; в анализе, обобщении полученных результатов и формулировке выводов; в личном участии в апробации результатов работы и подготовке публикаций по выполненной работе.

Апробация работы. Основные результаты работы докладывались и обсуждались на: III Международной конференции «Модернизация, Инновации, Прогресс: Передовые технологии в материаловедении, машиностроении и автоматизации» (MIP: Engineering-III-2021) (г. Красноярск, 2021 г.), II Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (ICMSIT-II-2021) (г. Красноярск, 2021 г.), Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг-2020» (ICIE-2020) (г. Сочи, 2020 г.), IV Международной научно-технологической конференции студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии» (МНТК-2020) (г. Новосибирск, 2020 г.), Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения – 2020: энергетика и цифровая трансформация» (г. Казань, 2020 г.), VIII-X Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 2017 г., 2018 г., 2019 г.), VI

Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Иркутск, 2020 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Цифровизация транспорта и образования», посвященной 125-летию железнодорожного образования в Сибири (г. Красноярск, 2019 г.), XIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2019) (г. Новосибирск, 2019 г.), XX-XXII межвузовской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (г. Красноярск, 2016 г., 2017 г., 2018 г.), 69-й Международной выставке «Идеи, изобретения и инновации IENA-2017» (Германия, г. Нюрнберг, 2017 г.), конкурсе Startup Village (г. Москва, 2017 г.), конкурсе Open Innovation Startup Tour (г. Томск, 2017 г., г. Красноярск 2018 г.), районном и городском этапах конкурса научно-технического творчества молодежи города Красноярска «Инженерная лига-2017» (г. Красноярск, 2017 г.).

Публикации. Результаты выполненных исследований отражены в 24 работах, 4 из которых опубликованы в ведущих журналах, рекомендованных ВАК, 2 – в трудах научных конференций, индексируемых в международной базе Scopus, 11 – в материалах и трудах Международных, Всероссийских и межвузовских научных конференций, 5 – в других изданиях, 1 – в патенте, 1 – в свидетельстве о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, включающего 161 наименование и 3 приложений. Общий объем работы составляет 178 страниц, включая 80 рисунков и 15 таблиц.

Соответствие паспорту специальности. Отражённые в диссертации научные положения соответствуют области исследования специальности 05.09.03 – «Электротехнические комплексы и системы» в связи с тем, что в работе рассматриваются вопросы исследования закономерностей преобразования энергии, определяющих функциональные свойства устройства для предупреждения обледенения проводов ЛЭП на основе электромеханического преобразователя. В частности, три из пяти пунктов паспорта специальности 05.09.03 полностью соответствуют содержанию работы:

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. По п. 1 разработаны аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП устройства, динамическая модель устройства и численная модель провода ЛЭП, присоединенной массы (капли воды) и устройства для предупреждения образования наледи.

п. 2. – Обоснование совокупности технических, технологических, экономических, экологических и социальных критериев оценки принимаемых решений в области проектирования, создания и эксплуатации электротехнических комплексов и систем. По п. 2 проведены численные исследования для оценки влияния параметров устройства на его динамику, а также получены закономерности влияния электрических и массогабаритных параметров устройства на амплитуду силы тока в индукторе, импульс силы точечного удара, амплитуду отклонения провода и ускорение, с которым движется присоединенная масса, обосновывающие выбор и ускоряющие поиск оптимальных параметров удара применительно к произвольному пролету и реализующего его устройства.

п. 3. – Разработка, структурный и параметрический синтез электротехнических комплексов и систем, их оптимизация, а также разработка алгоритмов эффективного управления. По п. 3 разработана методика проектирования устройства на основе решения задачи оптимизации по критериям минимальной амплитуды силы тока индуктора, силы инерции и массы устройства.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражены научные проблемы, актуальность темы, сформулированы цель и задачи работы, описаны методы исследований. Приведены основные положения, выносимые на защиту, изложены сведения о научной новизне и практической значимости, реализации и апробации работы.

В первой главе проведен статистический анализ гололедных аварий и методов борьбы, применяемых в энергетических сетях. В среднем по причине гололеда происходит от 6 до 8 крупных аварий в год, экономический ущерб исчисляется сотнями миллионов рублей. Отмечено, что количество опасных гидрометеорологических явлений имеет тенденцию к росту на протяжении

последних 25 лет. Приведены факторы, обуславливающие аварийность по причине гололедоопасной обстановки.

Показано, что решение задачи недопущения гололедных аварий требует целого комплекса мер, которые можно разделить на пассивные (прогнозирование гололедоопасных погодных условий, мониторинг гололеда на проводах) и активные (предупреждение гололедообразования, удаление наледи). Сформулированы критерии эффективности решения для борьбы с гололедообразованием на проводах ЛЭП как комплекса мер. Отмечена актуальность задачи по разработке устройства, реализующего активный метод и обеспечивающего повышение энергоэффективности решения.

Требованием к энергоэффективности обоснован выбор в пользу предупреждения гололедообразования на ударном принципе действия. Анализ решений, реализующих ударный принцип борьбы со льдом, позволил сформулировать задачи, которые необходимо решить при проектировании нового устройства. Для определения требований к режиму работы устройства – началу работы и периодичности срабатывания – изучен процесс замерзания капель воды на подложке, откуда следует, что не допустить перехода водяной пленки в состояние льда можно посредством ее ежеминутного удаления стряхиванием.

Показано, что реакция провода на точно приложенное внешнее воздействие может значительно отличаться в зависимости от его параметров. Обзор подходов к математическому моделированию удара по проводу ЛЭП показал, что ввиду сложности поставленной задачи для ее решения целесообразно применить приближенные численные методы.

Во второй главе обоснован выбор исполнительного механизма устройства для предупреждения гололедообразования из класса электромеханических преобразователей в пользу ЛИИЭП. Главным преимуществом ЛИИЭП для работы в устройстве предупреждения гололеда является способность обеспечивать соответствие параметров удара расчетным значениям в диапазоне сотен микросекунд и тысяч ньютонов. Отмечена важность и других достоинств.

Изучены системные свойства ЛИИЭП, ИС которого представляет собой индуктор в виде плоской катушки и боек в виде диска из электропроводного материала. Разработана аналитическая модель электродинамического

взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП с учетом подвижности частей ИС и сил сопротивления их движению.

Взаимодействие описывается системой дифференциальных уравнений (1) двухконтурной схемы замещения, включающей уравнения теории электрических цепей и механики, где i_1, i_2 – ток, протекающий в индукторе и бойке соответственно, M –

$$\begin{aligned} (L_0 + L_1) \frac{di_1}{dt} + (R_0 + R_1)i_1 + M \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dM}{dt} &= U_c \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt} &= 0 \\ C \frac{dU_c}{dt} &= -i_1 \\ \frac{d^2 z_1}{dt^2} &= \frac{i_1 i_2}{m_{\Sigma 1}(t)} \frac{dM}{dz} - \frac{f_{z_1}(t, z_1)}{m_{\Sigma 1}(t)} \\ \frac{d^2 z_2}{dt^2} &= -\frac{i_1 i_2}{m_{\Sigma 2}(t)} \frac{dM}{dz} + \frac{f_{z_2}(t, z_2)}{m_{\Sigma 2}(t)} \end{aligned} \quad (1)$$

взаимная индукция между индуктором и бойком, C, U_c – емкость и напряжение накопителя, z_1, z_2, z – координата перемещения индуктора, бойка и расстояние между индуктором и бойком соответственно, $m_{\Sigma 1}(t), m_{\Sigma 2}(t)$ – масса со стороны индуктора и бойка соответственно, изменяющаяся во времени в зависимости от массы провода, которая по мере распространения возмущения включается в движение, $f_{z_1}(t, z_1), f_{z_2}(t, z_2)$ – сила сопротивления движению индуктора и бойка соответственно. Для учета влияния силы тяжести, силы упругости возвратной пружины, силы трения индуктора или бойка о корпус устройства, а также силы сопротивления провода, вызванной тяжением, предложено выражение (2)

$$\overrightarrow{f_z(t, z)} = \overrightarrow{\mu u} + \overrightarrow{m(t)g} + \overrightarrow{k(z + \Delta z)} + \overrightarrow{\eta m(t)g} + 2N \frac{\overrightarrow{z}}{\sqrt{z^2 + (bt)^2}}, \quad (2)$$

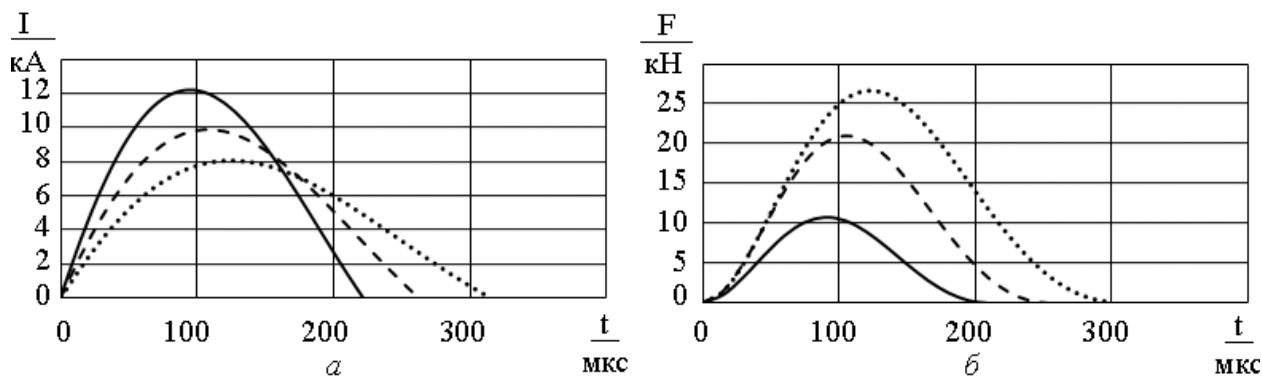
где μ – скорость увеличения массы провода, включенной в движение, $m(t)$ – масса со стороны бойка/индуктора u – скорость присоединяемого провода относительно бойка/индуктора, k – коэффициент упругости возвратной пружины, Δz – преднатяжение возвратной пружины, η – коэффициент трения.

С использованием аналитической модели исследованы способы снижения токовых нагрузок в цепи индуктора, влияние электрических параметров исполнительного механизма на время переходного процесса и электромагнитную силу (ЭМС), которые в свою очередь влияют на параметры удара. Расчеты показывают, что амплитуда силы тока снижается без

изменения времени переходного процесса только при снижении напряжения заряда. При уменьшении емкости конденсаторной батареи снижается не только амплитуда силы тока, но и время переходного процесса. В обоих случаях ЭМС имеет аналогичные зависимости. Изменение геометрических параметров индуктора – увеличение количества витков за счет увеличения диаметра индуктора или уменьшения ширины шины – приводит к увеличению предельного значения взаимной индуктивности (3)

$$M_0 = \frac{\mu_0 w d_s \Psi(\alpha, \xi)}{4\pi}, \quad (3)$$

где w – число витков катушки индуктора, d_s – средний диаметр индуктора, Ψ – величина, определяемая таблично. За счет этого уменьшается амплитуда силы тока, увеличивается время переходного процесса, но при этом увеличивается ЭМС (рис. 1). Увеличение массы отталкиваемого тела не влияет на время переходного процесса, однако приводит к незначительному увеличению амплитуды силы тока и ЭМС.



внешний диаметр индуктора, мм	— 150	-- 200 250
активное сопротивление, мОм	— 6,9	-- 11,8 16,7
индуктивность, мкГн	— 3,1	-- 12,1 28,2
взаимная индуктивность, мкГн	— 0,67	-- 1,32 2,08

Рисунок 1 – Зависимость силы тока (а) и ЭМС (б) от внешнего диаметра индуктора: 755 В, 1500 мкФ

Проведен анализ влияния способа крепления устройства на его конструктивное исполнение. Рассмотрены варианты бокового и нижнего крепления (рис. 2).

Проведен анализ места размещения устройства с учетом строения пролета. Сделан вывод об ограниченности радиуса его действия пределами пролета. Обоснована необходимость минимизации амплитуды бегущей волны.

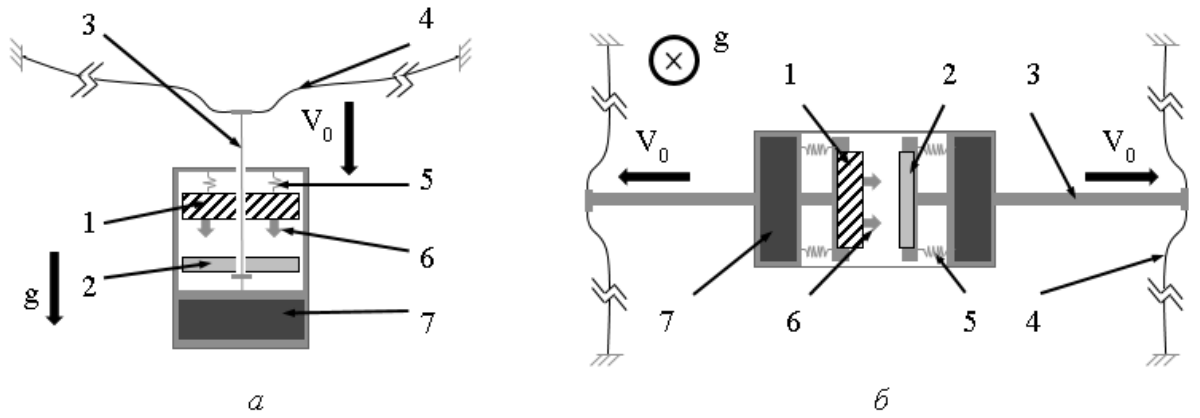


Рисунок 2 – Способ крепления устройства снизу (а), сбоку (б): 1 – индуктор; 2 – боек; 3 – штанга; 4 – провод ЛЭП; 5 – пружины (амортизационная система); 6 – сила Ампера; 7 – функциональный блок

Разработаны динамические модели движения частей ИС в месте крепления к проводу. Индуктор и боек рассматриваются как мгновенно отделяемые тела. Для нижнего способа крепления составленная система нелинейных дифференциальных уравнений движения второго порядка (4) линеаризована за счет пренебрежения сопротивлением провода и допущения о постоянстве массы, так что динамическая модель представляет собой выражение (5).

$$\begin{cases} m_{\Sigma 2} \frac{d^2 z_2}{dt^2} = -\mu \frac{dz_2}{dt} - k(z_2 - z_1) - 2N_z(t) \sin \frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + (bt)^2}}, \\ m_1 \frac{d^2 z_1}{dt^2} = k(z_2 - z_1) - \eta m_{\Sigma 2} g \end{cases}, \quad (4)$$

$$z_2(t) = \left(\frac{m_{\Sigma 2(0)}(v_2 - v_1)}{m_{\Sigma 2(0)} + m_1} + v_1 \right) t + \frac{m_1(v_2 - v_1)}{m_{\Sigma 2(0)} + m_1} \sqrt{\frac{km_{\Sigma 2(0)}m_1}{m_{\Sigma 2(0)} + m_1}} \sin \sqrt{\frac{k(m_{\Sigma 2(0)} + m_1)}{m_{\Sigma 2(0)}m_1}} t. \quad (5)$$

Для бокового способа крепления составлено нелинейное дифференциальное уравнение движения второго порядка (6), линеаризованное за счет пренебрежения сопротивлением провода и допущения о постоянстве массы, так что динамическая модель представляет собой выражение (7)

$$m_{\Sigma 2} \frac{d^2 z}{dt^2} = -\mu \frac{dz}{dt} - k(z + \Delta z) - \eta m_{\Sigma 2} g - 2N_x(t) \sin \frac{z}{\sqrt{z^2 + (bt)^2}}, \quad (6)$$

$$z(t) = \left(\Delta z + \frac{\eta m_{\Sigma 2(0)} g}{k} \right) \cos \sqrt{\frac{k}{m_{\Sigma 2(0)}}} t + \sqrt{\frac{m_{\Sigma 2(0)}}{k}} v_{2(0)} \sin \sqrt{\frac{k}{m_{\Sigma 2(0)}}} t - \Delta z - \frac{\eta m_{\Sigma 2(0)} g}{k}. \quad (7)$$

Проведена качественная оценка влияния начальной скорости и массы устройства на движение частей ИС в месте крепления к проводу. При прочих равных полупериоды при боковом ударе больше, чем при нижнем; соответственно, ускорения, с которыми движется боек – меньше. Для обоих типов крепления увеличение начальной скорости, сообщенной бойку и индуктору при фиксированной массе, обеспечивает большие ускорения.

В третьей главе описана численная модель системы тел «провода ЛЭП – капли воды – устройство для предупреждения гололедообразования». Взаимодействие элементов системы реализовано методом многотельного моделирования. Численная модель провода представляет собой цепочку масс, связанных упругими элементами. Для компьютерного моделирования используется формулировка МКЭ в терминах абсолютных узловых координат. Определение силы и крутящего момента в узлах провода выполняется в соответствии с моделью стержня Эйлера-Бернулли в нелинейной постановке. Проведен анализ по шагу дискретизации модели, проверка сходимости и адекватности модели в сравнении с несколькими экспериментальными данными при статическом и динамическом расчете.

Для висящей капли воды, подлежащей удалению с провода, выбрана математическая модель в сферическом приближении. Предложены критерии удаления капли как превышение силой инерции силы поверхностного натяжения (8) и превышение амплитудой колебаний провода половины радиуса висящей капли (9):

$$F_{\text{ин(рез)}} \geq 2\pi r \sigma \quad (8)$$

$$A_{\text{min}} \geq \frac{1}{2} r \quad (9)$$

где σ – коэффициент поверхностного натяжения воды, зависящий от температуры. Анализ влияния способа крепления устройства на движение провода показал, что в отличие от удара снизу, при ударе сбоку для достижения отрыва висящих капель по всей длине пролета требуется меньший импульс силы, а значит меньшие амплитуды колебаний, скачки тяжения и угол вибрации. Выбор в пользу бокового способа крепления обоснован результатами моделирования, требованиями к безопасности работы устройства и экономической целесообразностью за счет вдвое меньшего количества устройств, требуемых на пролет. Дальнейшие исследования проведены только для этого схемного решения. Проанализированы места

крепления устройства на 1/2 пролета в сравнении с 1/4 и 1/8 пролета. Крепление в центре, в отличие от смещенных, требует меньший импульс силы удара для достижения необходимых амплитуд и ускорения. Таким образом, подтверждено, что наилучшее место крепления устройства – в центре пролета.

Получены закономерности влияния силы и времени удара на амплитуду отклонения провода и ускорение, с которым движется присоединенная масса на конце пролета, что влияет на ее силу инерции и отрыв:

– при постоянном импульсе силы с уменьшением времени удара до некоторого значения и, соответственно, увеличением силы удара, наблюдаются рост амплитуды колебаний по всей длине пролета, максимального тяжения и ускорения присоединенной массы; дальнейшее уменьшение времени удара приводит к тем же значениям либо меньшим; увеличение импульса силы удара всегда соответствует росту амплитуды бегущей волны, максимального тяжения и ускорения присоединенной массы (рис. 3);

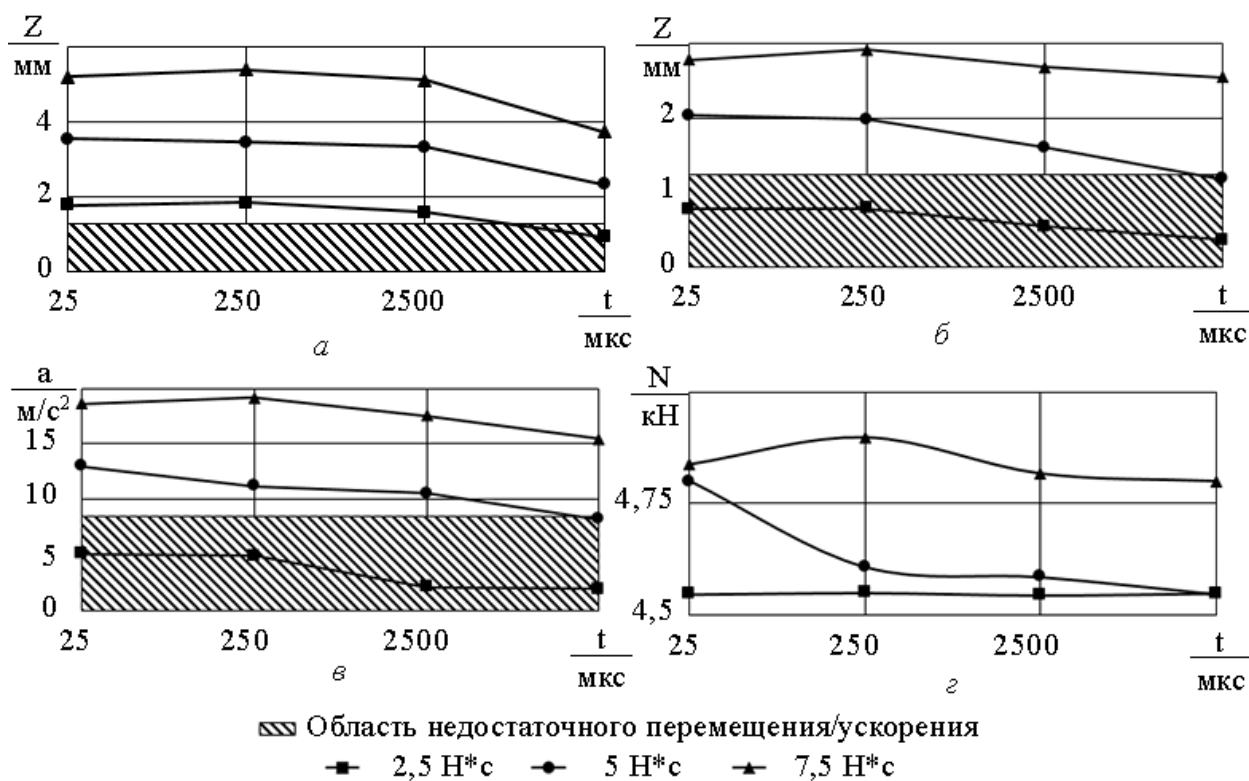


Рисунок 3 – Боковые удары по проводу в центре пролета: амплитуда отклонения в центре пролета (а) и на конце пролета (б); ускорение присоединенной массы на конце пролета (в); максимальное тяжение (г)

– варьированием параметров удара можно получить воздействие, оказывающее минимальный скачок тяжения при ускорении присоединенной массы и амплитуде отклонения, достаточной для ее отрыва от провода;

– при одних и тех же воздействиях для большей стрелы провеса присоединенная масса на конце пролета приобретает меньшее ускорение;

– при значительном увеличении импульса силы (увеличении силы и/или времени удара) и уменьшении коэффициента жесткости возвратной пружины динамика провода меняется: увеличивается амплитуда отклонений, пик тяжения, угол вибрации (рис. 4).

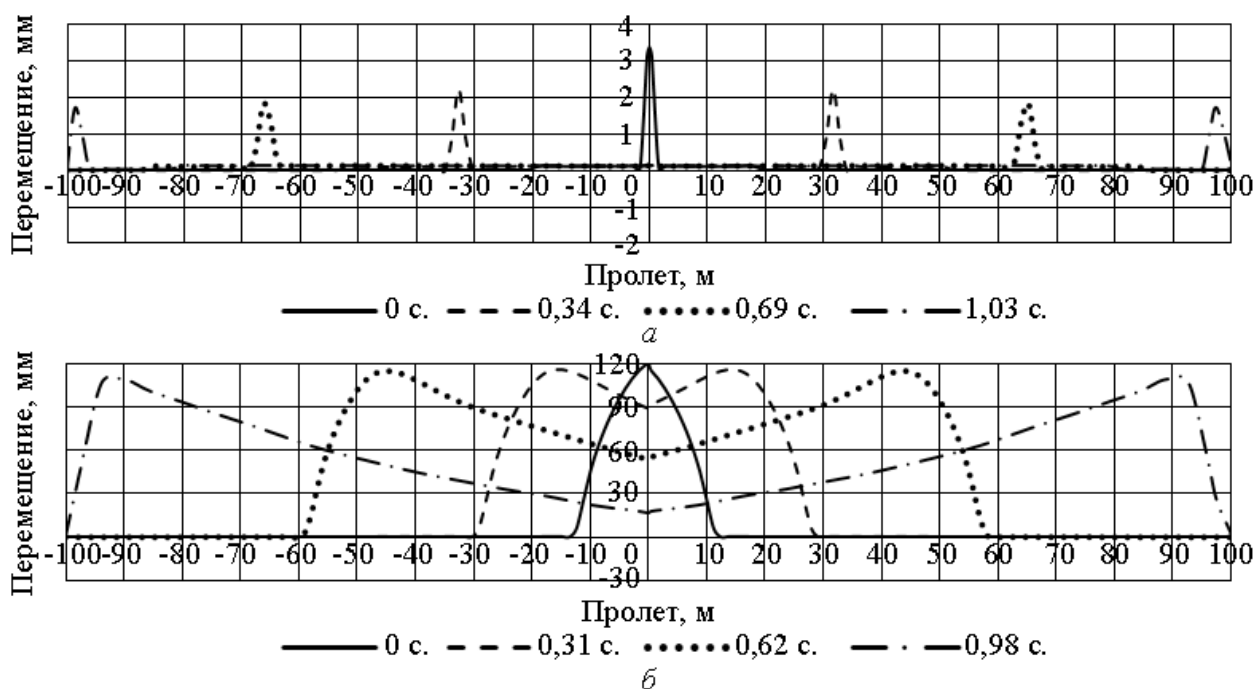


Рисунок 4 – Удар сбоку: $5 \text{ Н} \cdot \text{с}$, коэффициент жесткости $47,099 \text{ Н/мм}$ (а); $22,5 \text{ Н} \cdot \text{с}$, коэффициент жесткости $0,047099 \text{ Н/мм}$ (б)

В аналитической модели исследовано влияние требований к удару на геометрические и электрические параметры устройства. Значительное уменьшение амплитуды силы тока достигается увеличением времени удара при постоянном импульсе силы удара за счет увеличения массогабаритных параметров ИС и емкости конденсаторной батареи. Незначительное уменьшение амплитуды силы тока с сохранением времени удара возможно при снижении напряжении заряда конденсаторной батареи.

Проведены эксперименты на уменьшенной модели пролета ЛЭП при импульсном воздействии устройством (способ крепления сбоку) и при помощи маятника (удар при значительном уменьшении коэффициента жесткости возвратной пружины). Для измерения колебаний провода создана

оптическая измерительная система, позволяющая регистрировать колебания одновременно в двух точках провода. Расхождение результатов теоретических расчетов с экспериментальными исследованиями по среднему значению амплитуды колебаний и скорости распространения возмущения не превышает 4,4 % (рис. 5). Экспериментально подтверждены выявленные теоретически закономерности.

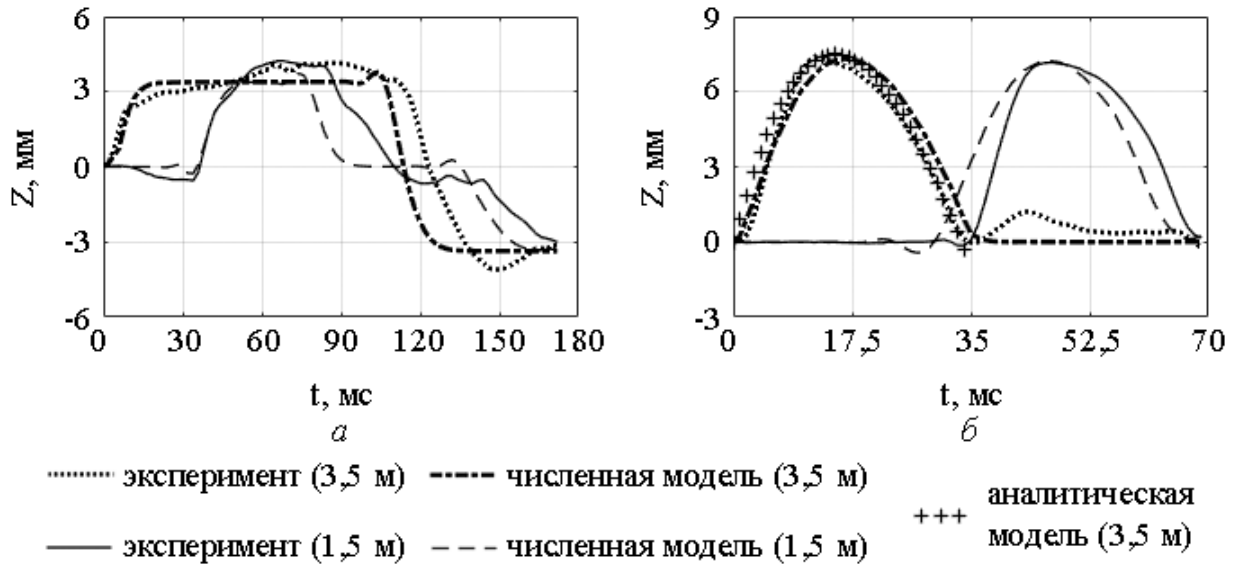


Рисунок 5 – Графики колебания провода при ударе маятником (а), при ударе устройством (б)

Четвертая глава посвящена формированию методики проектирования устройства предупреждения образования льда на основе ЛИИЭП. Первый этап заключается в сборе входных параметров провода, пролета, капель, подлежащих удалению, устройства, на основании которых формируются ограничения на время удара. На втором этапе задаются параметры численной модели, выполняется подготовка скрипта симуляции. Третий этап подразумевает решение оптимизационной задачи поиска значений управляющих параметров $\{F_{уд}, t_{уд}\}$ (сила удара, время удара), обеспечивающих минимизацию целевых показателей (критериев оптимальности) $I \rightarrow \min$ (амплитуда силы тока), $I_{уд} \rightarrow \min$ (импульс силы удара) и $M \rightarrow \min$ (масса устройства) при выполнении ограничений

$$a_{\min} \geq \frac{\sqrt{(2\pi r \sigma)^2 - (m_{\text{кап}} g)^2}}{m_{\text{кап}}} \quad \text{и} \quad A_{\min} \geq 1/2r.$$

Для упрощения задачи анализа значений, полученных на очередной итерации, а также оценки временных

затрат на следующую итерацию и проведения наиболее значимых

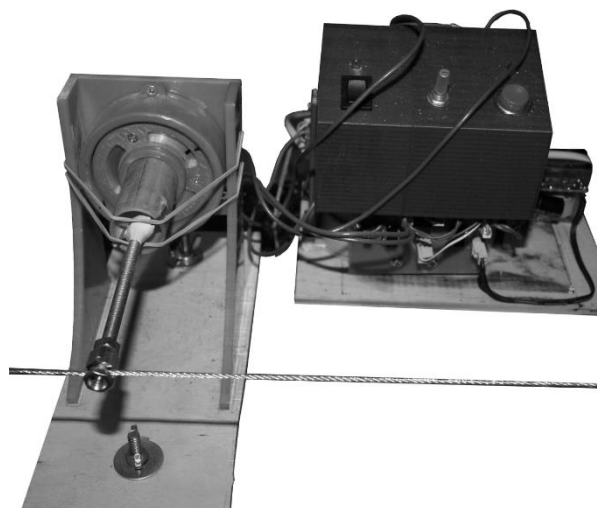


Рисунок 6 – Общий вид экспериментальной установки

экспериментов, разработан алгоритм «Планирование уточняющего эксперимента».

Четвертый этап заключается в определении электрических параметров ИС путем решения системы (1) численным методом. Решение найдено, если полученное перемещение бойка соответствует перемещению, вычисленному на предыдущем этапе.

Окончательный перечень параметров устройства включает в себя электрические и массогабаритные параметры ИС. По разработанной методике выполнен расчет экспериментальной установки для модели пролета ЛЭП с учетом условий подобия (рис. 6). Модель соответствует полномасштабному пролету длиной 65 м и проводу марки АС120/19.

Подтверждена энергоэффективность решения для борьбы с гололедообразованием на проводах ЛЭП как комплекса мер, включающего разработанное устройства по предупреждению гололедообразования в сравнении с решением на основе теплового метода, реализуемого при помощи ВУПГ-14/1200. Ресурсосбережение при использовании предложенного решения тем выше, чем меньше протяженность рабочего участка.

В заключении сформулированы основные научные и практические результаты работы.

В приложениях представлена принципиальная схема экспериментальной установки, документы на зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности и акты внедрения результатов диссертации.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

На основе проведенных в диссертации теоретических и экспериментальных исследований изложены новые научно обоснованные технические решения по предупреждению гололедообразования на проводах ЛЭП, внедрение которых обеспечивает повышение энергоэффективности борьбы с обледенением проводов ЛЭП и снижение аварийности по причине гололедообразования, что

имеет важное практическое значение для надежности функционирования объектов электроэнергетической отрасли. В том числе:

1. Проанализированы основные методы и средства, используемые при решении задачи недопущения гололедных аварий, в результате чего сформулированы критерии эффективности устройства для предупреждения обледенения проводов ЛЭП. Требованием к энергоэффективности обоснован выбор в пользу предупреждения гололедообразования на ударном принципе действия. Сформулированы задачи, которые необходимо решить при проектировании нового устройства. Выдвинуты требования к режиму работы устройства на основе анализа процесса замерзания капель воды.

2. Обоснован выбор исполнительного механизма устройства для предупреждения гололедообразования из класса электромеханических преобразователей в пользу ЛИИЭП. Проведен анализ места размещения устройства с учетом строения пролета и способа его крепления, на основании чего построено схемное решение устройства. Рассмотрены варианты бокового и нижнего крепления. Обоснована необходимость минимизации амплитуды бегущей волны.

3. Разработана аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка, учитывающая подвижность ИС и сил сопротивления движению ИС. Расхождение результатов теоретических расчетов с экспериментальными исследованиями находится в пределах 3-5 %. Исследованы способы снижения токовых нагрузок в цепи индуктора, влияние электрических параметров исполнительного механизма на время переходного процесса и ЭМС.

4. Разработаны динамические модели устройства при боковом и нижнем способах крепления для качественной оценки влияния его параметров на движение частей ИС в месте крепления к проводу. Исследовано влияние массы и начальной скорости устройства на его перемещение. Адекватность построенных моделей определяется обоснованностью принятых допущений, корректным применением методов математической физики, непротиворечивостью численных результатов известным теоретическим положениям и результатам диссертационного исследования.

5. Разработаны численные модели провода ЛЭП, присоединенной к проводу массы (капли воды) и устройства. Предложены критерии удаления

капли. Расхождение результатов теоретических расчетов с результатами предыдущих исследований не превышает 6 %.

6. Получены закономерности влияния электрических и массогабаритных параметров устройства на токовые нагрузки в цепи индуктора, импульс силы точечного удара, амплитуду отклонения провода и ускорение, с которым движется присоединенная масса на конце пролета. Снижение амплитуды силы тока до сотен ампер требует увеличения емкости конденсаторной батареи и массогабаритных параметров ИС. Боковое крепление в центре, в отличие от нижнего крепления или смещенного размещения, обеспечивает достижение отрыва висящих капель по всей длине пролета при меньшем импульсе силы, а значит меньшей амплитуде колебаний, скачках тяжения и угле вибрации. Таким образом, обоснована реализуемость предупреждения гололедообразования на ЛЭП путем удаления капель воды до их замерзания ударным методом и наиболее предпочтительный вариант размещения устройства: боковой, между фазными проводами, в центре пролета.

7. Разработана методика проектирования устройства предупреждения образования льда. В рамках методики решена задача оптимизации по критериям минимальной амплитуды силы тока индуктора, силы инерции и массы устройства. По методике спроектирована экспериментальная установка для работы на модели пролета ЛЭП в уменьшенном масштабе. Разработаны функциональные и принципиальные электрические схемы установки, измерительная система. Результаты экспериментов доказали адекватность теоретических расчетов, полученных на математических моделях. Отклонение среднего значения амплитуды и скорости распространения возмущения экспериментального исследования от результатов моделирования не превышает соответственно 3,2 % и 4,4 %.

В качестве возможностей развития темы исследования выделим следующие направления:

1. Исследование влияния формы индукторной системы на временные и энергетические характеристики воздействия, массогабаритные параметры устройства.
2. Исследование влияния экранирования на временные и энергетические характеристики воздействия.

3. Разработка средств автоматизации управления устройством, в том числе, с учетом изменения тяжения и стрелы провеса при изменяющихся погодных условиях.

4. Разработка решения для одноцепной ЛЭП.

5. Модернизация устройства с целью обеспечения независимости его работоспособности от нагрузки на ЛЭП путем организации автономного питания.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК:

1. Ратушняк, Вал.С. Исследование динамики провода под воздействием устройства для предотвращения гололедообразования / Вал.С. Ратушняк // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – Москва : АО «Корпорация «ВНИИЭМ», 2020. – Т. 178. – № 5 – С. 8-15.

2. Ратушняк, Вал.С. Разработка лабораторной установки для предупреждения образования льда на модели провода ЛЭП / Вал.С. Ратушняк, Вик.С. Ратушняк // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 4. – С. 43–53. DOI: 10.14529/power200405.

3. Лившиц, А.В. Методика определения параметров устройства предотвращения образования льда на проводах ЛЭП / А.В. Лившиц, Вал.С. Ратушняк, Вик.С. Ратушняк // Известия СПбГЭТУ «ЛЭТИ». – 2020. – № 7. – С. 77-86.

4. Ратушняк, Вал.С. Результаты экспериментального исследования ударного воздействия на лед, намороженный на провод ЛЭП [Текст] / Вал.С. Ратушняк // Измерение. Мониторинг. Управление. Контроль: Научный журнал. – Пенза: Изд-во ПГУ, 2020. – № 1 (31). – С. 59-66. DOI: 10.21685/2307-5538-2020-1-8.

Публикация в издании, индексируемом в наукометрической базе SCOPUS:

5. Livshits, A.V. Analytical model of the inductor system of the device to prevent ice formation on power lines / A.V. Livshits, Val.S. Ratushnyak, Vik.S. Ratushnyak, P. V. Novikov // International Conference on Metrological Support of Innovative Technologies (ICMSIT-II-2021), SPb, Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1889, 022033. DOI:10.1088/1742-6596/1889/2/022033.

6. Ratushnyak, Val.S. The Numerical Studies of the Reaction of the Overhead Transmission Lines to a Transverse Impact by Shaking Off Water Droplets / Val.S. Ratushnyak, A.V. Livshits, N.O. Epihina // 2020 International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing (ICIEAM), Sochi, 2020. P. 1-6. DOI: 10.1109/ICIEAM48468.2020.9112040.

Объекты интеллектуальной собственности:

7. Планирование уточняющего эксперимента / Вал.С. Ратушняк. – Свидетельство ГР программы для ЭВМ № 2020661945, 05.10.20.

8. Пат. РФ №2666754. Способ и устройство для удаления наледи с проводов линий электропередачи [Текст] / Вик.С. Ратушняк, А.В. Юрьев, Е.С. Ильин, И.С. Трухина, Вал.С. Ратушняк. – Бюл. № 26, 2018.

Публикации в других изданиях:

9. Ратушняк, Вик.С. Метод экспериментального исследования ударного воздействия на провод ЛЭП [Текст] / Вик.С. Ратушняк, Е.С. Ильин, Вал.С. Ратушняк // Computational nanotechnology: Научный журнал. – Москва: Изд-во Издательский дом «Юр-ВАК», 2019. – № 2. – С. 33-38.

10. Ратушняк, Вал.С. Некоторые аспекты выбора средств борьбы с гололедными отложениями на ЛЭП / Вал.С. Ратушняк, Вик.С. Ратушняк, Е.С. Ильин, О.Ю. Вахрушева // Известия Транссиба: Научный журнал. – Омск: Изд-во ОмГУПС, 2019. – № 1 (37). – С. 102 – 111.

11. Вахрушева, О.Ю. Некоторые аспекты магнито-импульсного способа очистки вагона. результаты компьютерного моделирования [Текст] / О.Ю. Вахрушева, Е.С. Ильин, Вал.С. Ратушняк // Вестник транспорта Поволжья: Научный журнал. – Самара: Изд-во СГУПС, 2019. – № 2 (74). – С. 21 – 28.

12. Ратушняк, Вал.С. Построение схемного решения устройства для предупреждения обледенения проводов ЛЭП [Электронный ресурс] / Вал.С. Ратушняк // Молодая наука Сибири, 2020. – № 2 (8). – Режим доступа: <http://mnv.irgups.ru/postroenie-shefnogo-resheniya-ustroystva-dlya-preduprezhdeniya-obledeneniya-provodov-lep>.

13. Ратушняк, Вал.С. Устройство для предотвращения гололедообразования на проводах ЛЭП [Текст] / Вал.С. Ратушняк // Материалы IV Международной научно-технологической конференции «Молодежь. Инновации. Технологии». Новосибирск: НГТУ, 2020. – С. 273-275.

14. Ратушняк, Вал.С. Выбор математической модели для расчета электромеханических процессов в индукторной системе [Текст] / Вал.С. Ратушняк // Материалы Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения – 2020: энергетика и цифровая трансформация». Казань: КГЭУ, 2020. – С. 87-90.

15. Ратушняк, Вал.С. Численные исследования волновых процессов в проводе ЛЭП при поперечном ударе [Текст] / Вал.С. Ратушняк, А.В. Лившиц // Материалы XIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2019). Новосибирск: НГТУ НЭТИ, 2019. – Т. 2. – С. 63-67.

16. Ратушняк, Вал.С. Экспериментальные и теоретические исследования разрушения льда при ударе [Текст] / Вал.С. Ратушняк // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Цифровизация транспорта и образования», посвященной 125-летию железнодорожного образования в Сибири. Красноярск: КрИЖТ ИрГУПС, 2019. – С. 406-410.

17. Ратушняк, Вал.С. Особенности построения дискретной модели провода ЛЭП для расчета поперечного удара [Текст] / Вал.С. Ратушняк // Материалы X Международной научно-практической конференции «Транспортная

инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: ИрГУПС, 2019. – Т. 2. – С. 39-43.

18. Ратушняк, Вик.С. Сравнение современных способов удаления гололедных образований с контактного провода [Текст] / Вик.С. Ратушняк, Вал.С. Ратушняк, М.В. Тимошенко // Материалы XXIV Всероссийской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте». Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2020. – С. 64-68.

19. Ратушняк, Вал.С. Выбор модели конечных элементов провода ЛЭП [Текст] / Вал.С. Ратушняк // Материалы XXII межвузовской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте». Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2018. – С. 52-54.

20. Ратушняк, Вал.С. Статистический анализ аварийных отключений электроэнергии из-за гололедообразования на проводах ЛЭП на территории РФ [Электронный ресурс] / Вал.С. Ратушняк, Вик.С. Ратушняк, Е.С. Ильин, О.Ю. Вахрушева // Молодая наука Сибири, 2018. – № 1 (1). – Режим доступа: <http://mrv.irgups.ru/statisticheskiiy-analiz-avariynyh-otklyucheniyy-elektroenergii-iz-za-gololedoobrazovaniya-na-provodah>.

21. Ратушняк, Вал.С. Некоторые аспекты волновых процессов в проводе при поперечном ударе / Вал.С. Ратушняк // Материалы IX Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: ИрГУПС, 2018. – Т. 1. – С. 338-342.

22. Ратушняк, Вал.С. Обоснование необходимости разработки нового способа очистки проводов ЛЭП от гололедных отложений / Вал.С. Ратушняк // Материалы XXI межвузовской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте». Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2017. – С. 62-69.

23. Ратушняк, Вал.С. Аппаратный комплекс для удаления наледи с проводов высоковольтных ЛЭП электроимпульсным методом / Вал.С. Ратушняк, И.С. Трухина, А.В. Юрьев // Материалы VIII Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона». Иркутск: ИрГУПС, 2017. – Т. 1. – С. 364-366.

24. Ратушняк, Вал.С. Электроимпульсная установка для удаления наледи с проводов ЛЭП / Вал.С. Ратушняк, Вик.С. Ратушняк, И.С. Трухина, А.В. Юрьев // Материалы XX межвузовской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте». Красноярск: КРИЖТ ИрГУПС, 2016. – С. 10-13.

Отпечатано в типографии

Красноярского института железнодорожного транспорта – филиала ИрГУПС

660028, г. Красноярск, ул. Новая Заря, дом 2И, Тел. (391) 248-16-44

Формат 60 x 84/16. Объем 1,5 п.л. Тираж 110 экз.

Заказ № 091. Подписано в печать 02.09.2021 г.