

Федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
«Иркутский государственный университет путей сообщения»



На правах рукописи

РАТУШНЯК ВАЛЕНТИНА СЕРГЕЕВНА

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНОЕ ПРЕДУПРЕЖДЕНИЕ ГОЛОЛЕДООБРАЗОВАНИЯ  
НА ОСНОВЕ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

Специальность 05.09.03 – Электротехнические комплексы и системы

Диссертация  
на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Научный руководитель  
Лившиц Александр Валерьевич  
доктор технических наук, профессор

Иркутск – 2021

**ОГЛАВЛЕНИЕ**

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА.....	12
1.1 Статистический анализ отказов по причине гололеда в энергетических сетях.....	12
1.2 Комплексный подход к борьбе с обледенением линий электропередач .....	16
1.3 Обзор устройств ударного и вибрационного удаления льда.....	23
1.4 Кинетика кристаллизации воды на поверхности провода.....	31
1.5 Подходы к математическому моделированию динамики провода .....	36
1.6 Цели и задачи исследования .....	40
ГЛАВА 2 ПОСТРОЕНИЕ СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ .....	42
2.1 Постановка задачи .....	42
2.2 Обоснование исполнительного механизма ударного устройства .....	44
2.3 Аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в электромеханическом преобразователе .....	48
2.4 Способы снижения токовых нагрузок в электромеханическом преобразователе.....	56
2.5 Определение места размещения устройства.....	60
2.6 Анализ влияния способа крепления устройства на его конструктивное исполнение.....	65
Выводы по главе 2.....	73
ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ .....	75
3.1 Определение параметров численной модели.....	75
3.1.1 Параметры численной модели провода .....	75
3.1.2 Параметры численной модели капли .....	77
3.2 Моделирование в системе кинематического анализа .....	80
3.3 Проверка адекватности численной модели провода.....	87
3.4 Анализ влияния способа крепления устройства на движение провода .....	92
3.5 Анализ влияния способа крепления устройства на стряхивание капель .....	97

3.6 Анализ влияния места крепления устройства на движение провода и стряхивание капель .....	99
3.7 Эксперименты на модельном пролете .....	102
Вывод по главе 3 .....	112
ГЛАВА 4. ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА .....	115
4.1 Оптимизационная задача поиска параметров воздействия и устройства .....	115
4.2 Методика проектирования устройства предупреждения образования льда ..	117
4.3 Расчет экспериментальной установки .....	125
4.3.1 Определение критериев подобия для масштабирования .....	125
4.3.2 Проектирование экспериментальной установки .....	129
4.4 Разработка экспериментальной установки .....	135
4.5 Энергоэффективность устройства для предупреждения гололедообразования .....	145
Выводы по главе 4 .....	147
ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....	149
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ .....	152
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	153
ПРИЛОЖЕНИЕ А Принципиальная схема экспериментальной установки .....	172
ПРИЛОЖЕНИЕ Б Документы на зарегистрированные объекты интеллектуальной собственности .....	173
ПРИЛОЖЕНИЕ В Акты внедрения научных результатов диссертации .....	175

## ВВЕДЕНИЕ

**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 поставленной цели 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 взаимодействия.

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, 29-30 апреля 2021 г.), II Международной конференции «Метрологическое обеспечение инновационных технологий» (ICMSIT-II-2021) (г. Санкт-Петербург, г. Красноярск, 3-6 марта 2021 г.), Международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг-2020» (ICIE-2020) (г. Сочи, 18-22 мая 2020 г.), IV Международной научно-технологической конференции студентов и молодых ученых «Молодежь. Инновации. Технологии» (МНТК-2020) (г. Новосибирск, 28-30 апреля 2020 г.), Международной молодежной научной конференции «Тинчуринские чтения – 2020: энергетика и цифровая трансформация» (г. Казань, 27-30 апреля 2020 г.), VIII-X Международной научно-практической конференции «Транспортная инфраструктура Сибирского региона» (г. Иркутск, 28 марта – 01 апреля 2017 г., 10-13 апреля 2018 г., 21-24 мая 2019 г.), VI Всероссийской научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Наука и молодежь» (г. Иркутск, 19-21 мая 2020 г.), Всероссийской научно-практической конференции «Цифровизация транспорта и образования», посвященной 125-летию железнодорожного образования в Сибири (г. Красноярск, 09-11 октября 2019 г.), XIII Всероссийской научной конференции молодых ученых «Наука. Технологии. Инновации» (НТИ-2019) (г. Новосибирск, 02-06 декабря 2019 г.), XX-XXII межвузовской научно-практической конференции «Инновационные технологии на железнодорожном транспорте» (г. Красноярск, 21-24 ноября 2016 г., 07 ноября

2017 г., 26 октября 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.).

**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.

## ГЛАВА 1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

### 1.1 Статистический анализ отказов по причине гололеда в энергетических сетях

Для передачи электроэнергии на большие расстояния и распределения ее по потребителям широко применяют воздушные линии электропередачи (ЛЭП), одним из основных элементов которых являются провода. В осенне-зимний период (ОЗП) при определенных метеорологических условиях, таких как высокая влажность, ветер, резкие перепады температуры воздуха, на проводах образуются отложения в форме льда и снега. Даже небольшое обледенение может значительно увеличить механические нагрузки на все элементы воздушных линий: так, при ледяной муфте толщиной 10 мм масса двухцепной ЛЭП из 6 проводов 200-метровой длины возрастает с 565,2 кг до 1,5 тонн. При муфте 30 мм – до 5 тонн, при муфте 40 мм – до 8 тонн.

В результате значительного увеличения массы проводов и воздействующих на них динамических и статических нагрузок происходят нежелательные и опасные явления, особенно при сильном ветре. К их числу относятся: обрыв проводов под тяжестью снега и льда, недопустимое сближение проводов и их сильное раскачивание (так называемая «пляска»), ухудшение защитных свойств изоляторов, разрушение опор. Согласно расчетам [1], толщина стенки гололеда оказывает более сильное влияние на коэффициент запаса прочности, чем ветровая нагрузка и температурный фактор.

Общая протяженность линий электропередачи в России составляет порядка 3 млн. км [2], из которых значительная часть находится в третьем, четвертом и особом районах по гололеду, подверженных в зимнее время и межсезонье образованию сверх расчетных гололедных отложений [3] (рисунок 1). В таких регионах, как Северо-Запад, Поволжье, Оренбуржье, Крым, Дальний Восток, из-за погодных условий может наблюдаться превышение нормативных гололедных нагрузок до 1-2 раз в сезон.

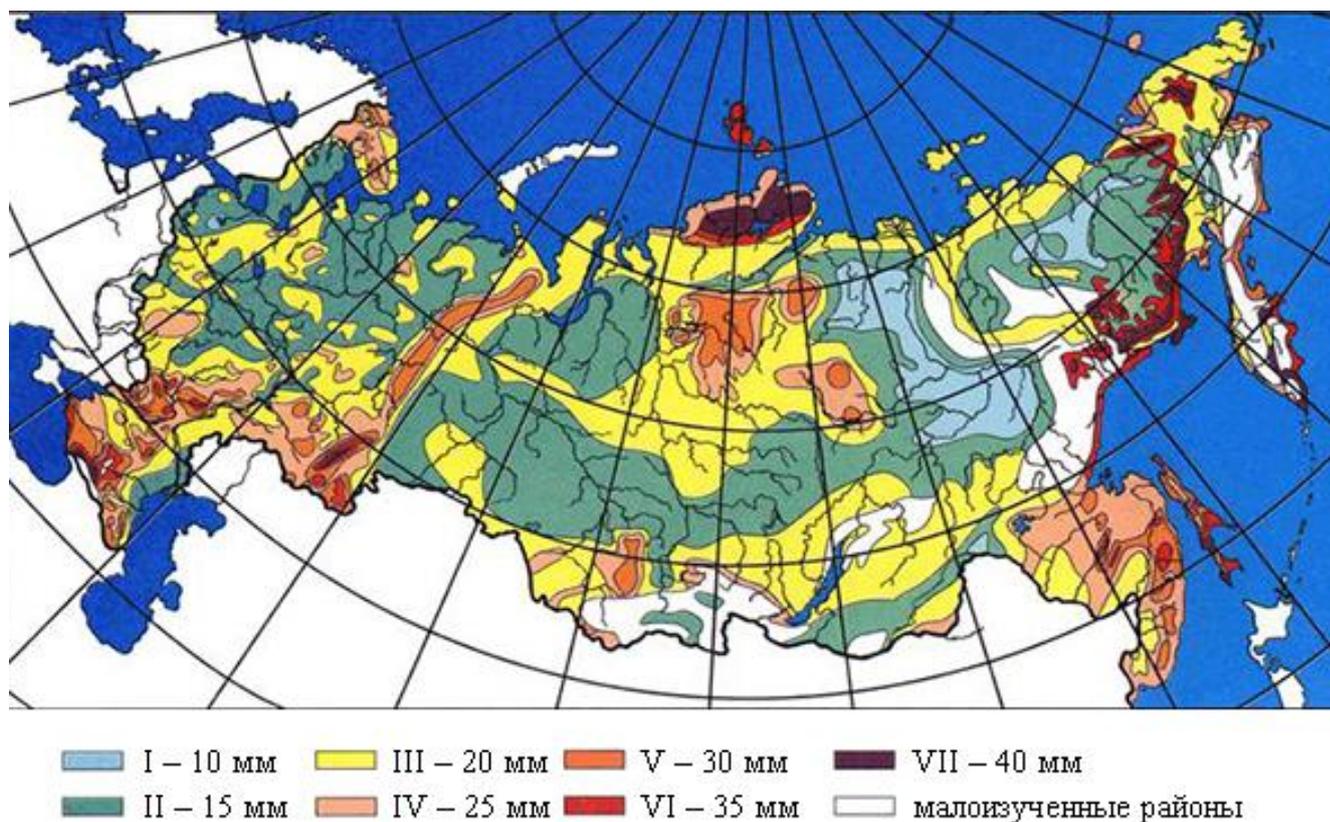


Рисунок 1 – Карта гололедных районов России

По данным Всероссийского научно-исследовательского института гидрометеорологической информации – Мирового центра данных (ВНИИГМИ-МЦД) [4], в период с 1991 по 2015 гг. сохранялась тенденция роста количества опасных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) и неблагоприятных условий погоды (НУП), нанесших социальные и экономические потери за последние 25 лет (рисунок 2).

Прирост ОГЯ и НУП составил в среднем 15 случаев в год. Такая динамика связана с увеличением экономической активности и количества хозяйствующих потребляющих объектов. Тенденция к росту ОГЯ подтверждается статистикой ПАО «Россети» за период 2016-2019 гг. [5-7] (таблица 1). При средней продолжительности антигололедных мероприятий  $2,71 \pm 0,56$  ч на одно ОГЯ, затраты электросетевых компаний зависят от гололедоопасной обстановки в ОЗП.

По результатам анализа факторов ОГЯ, нанесших социальные и экономические потери, построена диаграмма распределения по видам явлений (рисунок 3). Из диаграммы видно, что почти 20 % всех ОГЯ за 1991-2015 гг. приходится на вторую группу явлений – сильная метель, сильный снег, налипание

мокрого снега, гололед, гололедица. Таким образом, угроза аварий по причине гололедных явлений занимает третье место среди всех ОГЯ. Статистические данные из Министерства энергетики [6, 8, 9] подтверждают высокую значимость гололедных явлений для уровня массовых нарушений электроснабжения: так, доля аварий по причине гололеда от общего количества аварий в течение 2013-2018 гг. колеблется около  $11 \pm 3$  % (таблица 2).

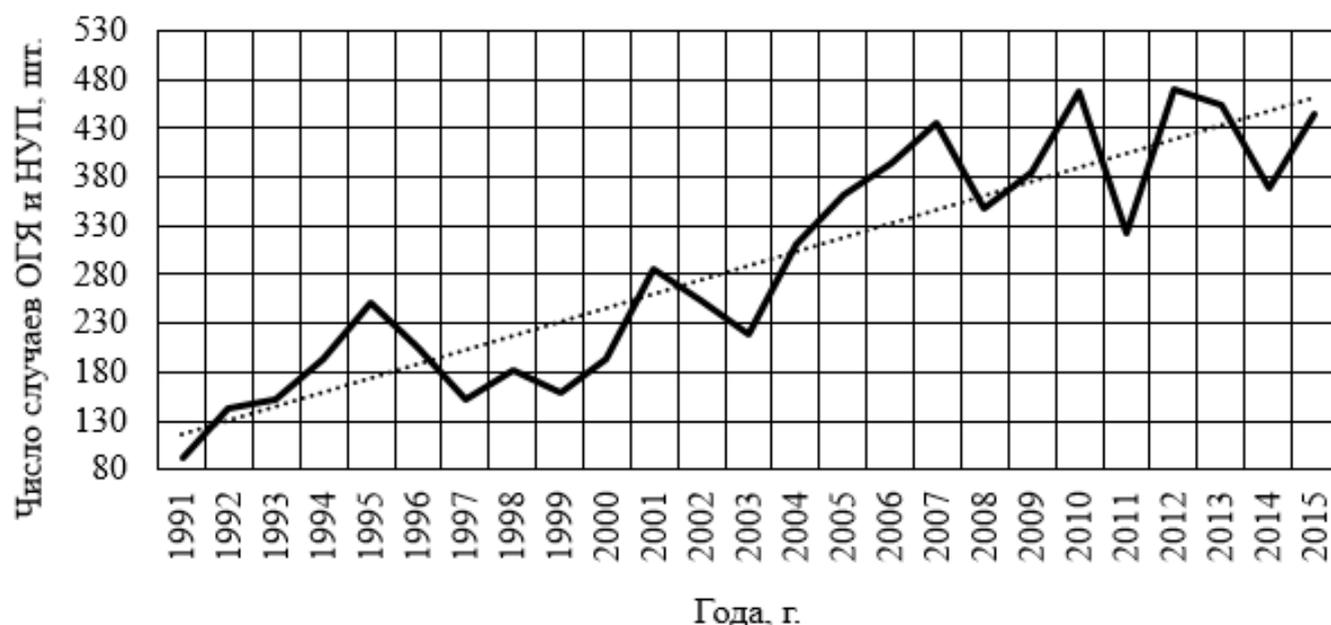


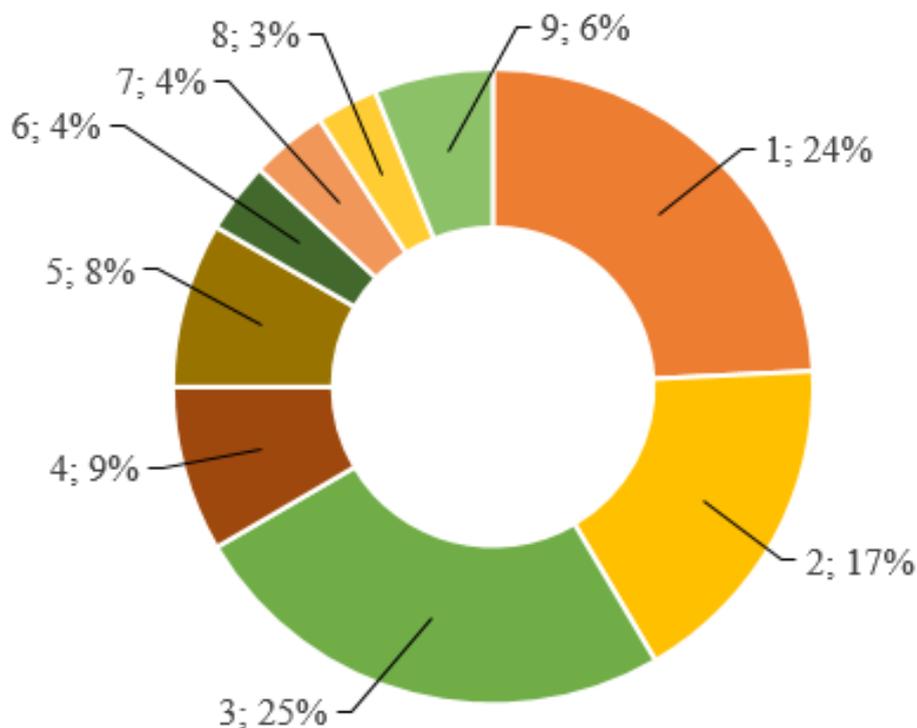
Рисунок 2 – Распределение суммарного числа случаев ОГЯ и НУП по годам, нанесшие социальные и экономические потери

Таблица 1 – Число случаев ОГЯ и антигололедные мероприятия

ОЗП	ОГЯ, шт.	Антигололедные мероприятия, шт.		Длительность удаления, ч.		Массовые отключения, шт.
		плавка гололеда	механическое удаление гололеда	всего	в среднем	
2016–2017	175	1572	396	573	0,29	27
2017–2018	241	1605	522	512	0,24	26
2018–2019	269	1446	554	579	0,28	11

Количество аварийных отключений зависит от ряда факторов. Это и увеличение протяженности ЛЭП за счет введения в эксплуатацию новых участков [10], в том числе в гололедоопасных районах; и возникновение гололедно-изморозевых отложений на проводах ЛЭП в регионах, не отнесенных к регионам

с повышенным гололедообразованием; и погодные условия; и уровень готовности электросетевых предприятий к прохождению ОЗП; и эффективность методов недопущения гололедных аварий. Так, в период ОЗП 2017-2018 гг. произошел прирост количества аварий по причине гололеда на 87 % в сравнении с предыдущим ОЗП, в период ОЗП 2014-2015 гг. – на 15 %, несмотря на проведенное количество плавок, почти вдвое превысившее предыдущий ОЗП (таблица 2).



- 1 сильный ветер, ураган, шквал, смерч, пыльные бури
- 2 сильная метель, сильный снег, налипание мокрого снега, гололед, гололедица
- 3 сильный дождь, продолжительный дождь, ливень, град, гроза
- 4 мороз, заморозки, сильная жара, резкое повышение/понижение температуры
- 5 весеннее половодье, дождевой паводок, наводнение, нагонные явления
- 6 лавина, сель
- 7 засуха атмосферная/почвенная, суховей
- 8 чрезвычайная пожарная опасность
- 9 сильный туман, тягун, сильное волнение и др.

Рисунок 3 – Доля случаев ОГЯ (по видам опасных явлений)

Среди практикуемых методов борьбы с обледенением отмечены только два [6, 8, 9]: тепловой и механический. В подавляющем большинстве случаев применяется тепловой способ, то есть плавка гололеда (таблица 2).

Таблица 2 – Доля аварий по причине гололеда

ОЗП	Число аварийных отключений по причине гололеда, шт. (%)	Общее число аварий, шт.	Доля аварий по причине гололеда от общего числа аварий, %	Методы борьбы с обледенением	
				Плавка гололеда, шт.	Механическое удаление гололеда, шт.
2013–2014	420	4841	8,68	538	56
2014–2015	481 (+15)	3983	12,08	919	47
2015–2016	310 (-36)	3755	8,26	398	78
2016–2017	269 (-13)	3439	7,82	655	66
2017–2018	503 (+87)	3404	14,78	692	95

Прогрессирующая статистика случаев ОГЯ указывает на рост затрат электросетевых компаний на борьбу с гололедом при увеличивающейся протяженности ЛЭП. Дополнительная нагрузка на провода, связанная с недостатками применяемых методов борьбы с гололедом, повышает вероятность их преждевременного износа и ставит актуальный вопрос о разработке безопасного и эффективного метода борьбы с обледенением проводов ЛЭП.

## 1.2 Комплексный подход к борьбе с обледенением линий электропередач

Недопущение аварий по причине гололеда на проводах – конечная стратегическая цель энергетических компаний. Для достижения этой цели требуется решить целый спектр задач: прогнозирование гололедоопасной обстановки, мониторинг текущего состояния линии, предупреждение обледенения ЛЭП и удаление наледи. На сегодняшний день предложено большое количество средств и методов, а также устройств и изобретений, направленных на решение этой проблемы. Только способам удаления посвящено более 170

патентов российских и мировых изобретений. Исследованием их эффективности, сравнительным анализом и классификацией занимались как отечественные, так и зарубежные ученые [11-19].

Большинство изобретений относится к тепловым методам (в терминологии классификации [13]), из которых наиболее широко применяется плавка регулируемым постоянным током. Большой вклад в разработку методов плавки гололеда внесли Левченко И. И., Засыпкин А. С., Дьяков А. Ф. и др. Исследованию проблем этого метода и разработке математической модели таяния льда от подогрева посвящено много работ [16, 20]. Разработанная в ОАО «НИИПТ» серия управляемых выпрямителей для плавки гололеда (ВУПГ) введена в эксплуатацию на ряде подстанций по России. При подключении к стационарной подстанции, ВУПГ позволяет осуществлять плавку льда в радиусе 40 км. При этом ток плавки может составлять до 1200 А, в зависимости от марки провода. Комплектация ВУПГ включает в себя систему управления, регулирования, защиты и автоматики (СУРЗА) весом 25 кг (рисунок 4а) и трехфазный выпрямитель, размещаемый в стандартном 20-футовом транспортном контейнере весом 4 т. (рисунок 4б).

Главным недостатком метода является необходимость отключения потребителей на время удаления наледи. Гололедоопасные погодные условия могут сохраняться на протяжении нескольких дней, а на освобождение проводов ото льда требуются десятки мегаватт. Ток плавки в 1,5-2 раза превышает длительно допустимый ток, поэтому велик риск пластических деформаций и отжига проводов с последующей необратимой потерей прочности.

Другой недостаток рассмотренного метода заключается в невозможности применить его за пределами радиуса действия размещенной на подстанции установки. Эту проблему решают передвижные системы: например, мобильная установка для плавки гололеда (УПГМ), разработанная ОИВТ РАН (рисунок 5а), или мобильная система управляемой плавки гололеда (МСУПГ), разработанная компанией ПитерЭнергоМаш (рисунок 5б). Основным функциональным модулем

УПГМ является тиристорный преобразователь В-ТШПТ-1,3к-700, МСУПГ – тиристорный выпрямитель управляемой плавки гололеда ВУПГ.



а



б

Рисунок 4 – Комплектация ВУПГ: а – шкаф СУРЗА; б – контейнер

Кроме необходимости отключения ЛЭП на период антигололедных мероприятий и других недостатков, связанных с применением управляемых выпрямителей для плавки гололеда, мобильные установки обладают более высокой стоимостью. Например, если для плавки требуется напряжение 10 кВ, то необходимо применять дорогостоящий дизель-генератора 2,5 МВт напряжением 11 кВ. Другой недостаток метода связан с затрудненным доступом к ВЛ. Согласно методу определения целесообразности [21] применения мобильных установок для плавки гололеда на проводах ВЛ вычислено, что УПГМ следует применять там, где льдом покрыто не более 12 % полной длины ВЛ. В противном случае применение мобильных установок экономически неоправданно. Таким образом, чем более протяженный участок ВЛ требуется проплавить, тем сильнее возрастают затраты.

Методы предупреждения гололедообразования зачастую связаны с профилактическим нагревом проводов за счет включения в контур цепи искусственной нагрузки [22] или использования проводов с переменным сопротивлением (VRC) [23]. Эти методы энергонеэффективны, однако, позволяют

осуществлять антигололедные мероприятия удаленно и без отключения потребителей.

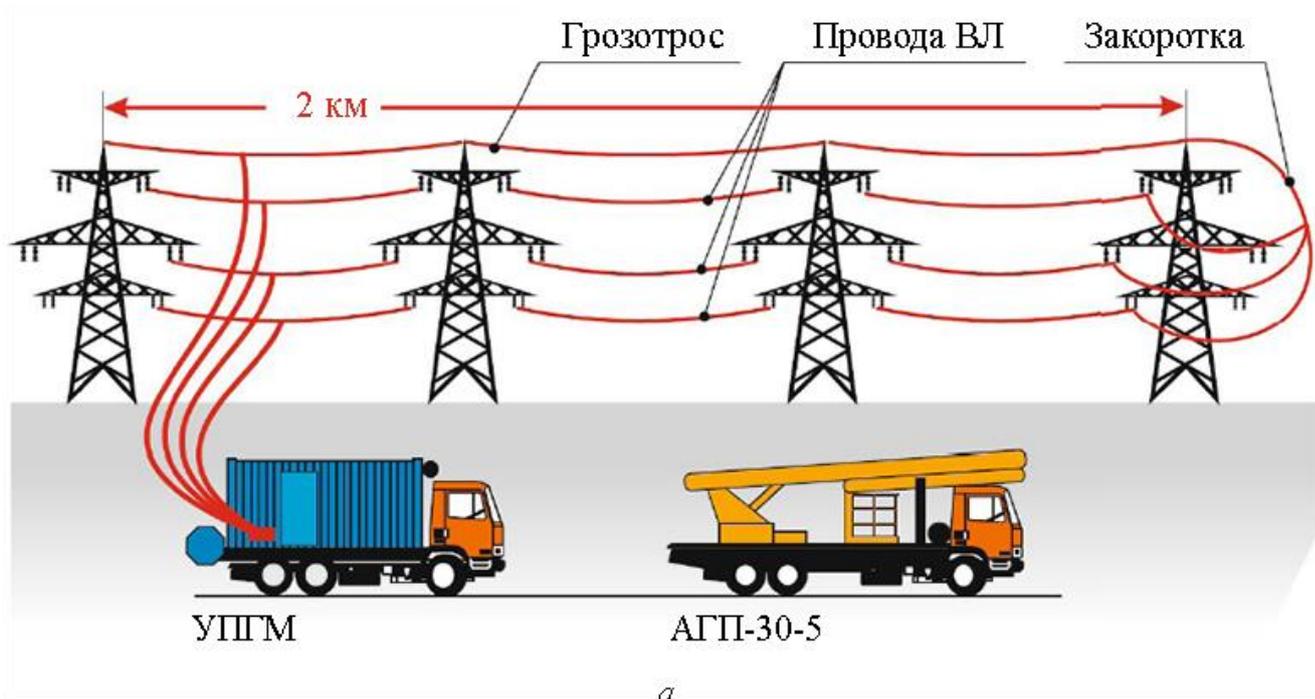


Рисунок 5 – Передвижные системы для плавки гололеда: а – автоконтейнеровоз УПГМ; б – установка МСУПГ

Другие подходы связаны с модификацией механических характеристик проводов: увеличение крутильной жесткости (АЕРО-Z), способствующее самосбросу гололеда [13, 24], покрытие оболочкой, материал которой слабо подвержен налипанию льда и снега (СИП). Значимыми сдерживающими

факторами внедрения усовершенствованных проводов являются их более высокая стоимость в сравнении с традиционно принятыми в эксплуатацию, ограничения по классу напряжения, необходимость переоборудования действующих ЛЭП при том, что эти методы не гарантируют полного предотвращения гололедообразования.

Обобщая вышесказанное, можно заключить, что как существующие, так и разрабатываемые методы предупреждения и борьбы с гололедом имеют один или несколько недостатков [25]:

- значительные энергозатраты на работу устройства;
- необходимость отключения ЛЭП;
- низкая скорость удаления наледи;
- необходимость активного участия персонала для транспортировки устройства к месту удаления наледи, его установки на провод и управления;
- повреждение провода ЛЭП вследствие работы устройства;
- высокая стоимость самого устройства.

Методы предотвращения и борьбы с гололедом не могут обойтись без устройств прогнозирования и мониторинга, поскольку своевременность активизации антигололедных мероприятий определяет их эффективность. Среди методов мониторинга отметим локационный [26], как обеспечивающий раннее обнаружение гололеда, начиная с толщины 0,5 мм с указанием места его образования. Метод опробован в условиях опытной эксплуатации в течение нескольких лет. Среди методов прогнозирования наступления гололедоопасных погодных условий отметим термодинамический способ [27], основанный на показателях температуры провода, относительной влажности и температуры воздуха.

Таким образом, недопущение гололедных аварий включает в себя комплекс мер: как активных (борьба с гололедом и недопущение его образования), так и пассивных (прогнозирование гололедоопасных погодных условий и мониторинг гололеда на проводах). И если среди пассивных методов существуют такие, которые характеризуются высокой степенью проработанности подходов,

достоверностью получаемых с их помощью данных и в итоге удовлетворительно отвечающие решению своих задач, то среди активных методов поиск решения до сих пор продолжается [28-31]. Отдельные попытки апробации и внедрения некоторых альтернативных разработок не получают широкого распространения в связи с тем, что ни одна из них не решает поставленную задачу лучше, чем используемый и хорошо проработанный метод плавки. Таким образом, актуальной задачей является разработка устройства для предупреждения и / или борьбы с обледенением проводов ЛЭП.

Сформулируем критерии эффективности решения для борьбы с гололедообразованием на проводах ЛЭП как комплекса мер. Будем рассматривать критерии из расчета продолжительности гололедоопасной обстановки (например, 1 час) и длины линии, подвергающейся обледенению (например, 80 км).

*Энергозатраты на работу решения:* предлагается оценивать в зависимости от рассматриваемого решения и диаметра присоединенной массы, подлежащей удалению. Выражения по расчету энергозатрат для некоторых методов (теплого, ударного, режущего и других) приведены в [13, 32]. Толщина стенки образовавшегося льда вычисляется как произведение интенсивности обледенения и периода времени от начала гололедоопасной обстановки до начала работ по борьбе с гололедом. Так, по оценкам [13], энергозатраты на расплавление льда толщиной стенки 20 мм на проводе диаметром 15,2 мм длиной 1 км составляют  $6,78 \cdot 10^8$  Дж = 188 кВт\*ч, что в пересчете на 80 км по 6 проводов в пролете составляет 90,24 МВт\*ч. В случае оценки энергозатрат уже готовых решений, следует пользоваться доступной информацией из технической документации. Например, энергозатраты на работу двух ВУПГ-14/1200, подключаемых к двухцепной ЛЭП по схеме «фаза-две фазы» составляют 33,6 МВт\*ч.

*Продолжительность отключения энергопотребителей.* Этот показатель зависит от требований к условиям работы рассматриваемого решения и его готовности к своевременному реагированию на гололедоопасную обстановку. Продолжительность отключения предлагается оценивать либо как продолжительность гололедоопасной обстановки, либо как время, необходимое

для удаления образовавшегося льда. Например, для работы ВУПГ-14/1200 требуется отключение потребителей, время плавки вычисляется по зависимостям, приведенным в [33].

*Затраты на доставку и управление:* предлагается оценивать затраты человеко-часов на доставку и управление решением. На эти затраты влияют такие особенности решения как стационарность или мобильность, автоматическое или ручное управление. Например, при работе ВУПГ-14/1200 на подстанции, доставка в период гололедоопасной обстановки не требуется; наличие цифровой микропроцессорной системы управления, регулирования, защиты и автоматики позволяет минимизировать затраты на управление решением.

*Повреждение элементов конструкции ЛЭП.* Предлагается оценивать как стоимость элементов конструкции ЛЭП, которые могут подвергаться повреждению: провода, изоляторы, арматура, опоры и другое. Например, под воздействие теплового метода повреждению подвергаются провода. Повышение температуры проводов приводит к их отжигу и снижению механической прочности, а также к провисанию проводов, что может уменьшить изоляционные расстояния. В результате могут быть нарушены габариты воздушной линии, т. е. снижены надежность и безопасность ее работы. Например, стоимость 1 м провода АС120/19 составляет 100 руб., что в пересчете на 80 км по 6 проводов в пролете составляет 48 млн. руб.

*Стоимость:* предлагается оценивать затраты на весь комплекс мер, включая стоимость самого оборудования для удаления или предупреждения гололеда, затраты на его доставку, установку, обслуживание, сопровождающие системы. Так, любая система удаления льда сопровождается системой мониторинга гололедообразования. Например, для работы ВУПГ-14/1200 требуется АИСКГН, стоимость поставки которой составляет порядка 8 млн. руб. Стоимость двух ВУПГ-14/1200 составляет порядка 40 млн. руб.

### 1.3 Обзор устройств ударного и вибрационного удаления льда

Выбор принципа борьбы с образующимся льдом в первом приближении обосновывается энергоэффективностью, поскольку все остальные критерии эффективности определяются конструктивными особенностями решения. Механическое разрушение льда считается наименее энергозатратным [12, 13, 32, 34, 35], в связи с этим рассмотрим особенности этого подхода и устройства, реализующие его.

На сегодняшний день накоплены обширные знания, подкрепленные теоретическими и экспериментальными исследованиями в области физико-механических характеристик льда. Известно, что на его разрушение влияют такие факторы, как температура [36], наличие сдвиговых напряжений [37], скорость удара [36, 38, 39]. Малая скорость нагружения вызывает лишь упругие деформации, при возрастании скорости удара наблюдаются упругопластические деформации, и наконец, наступает хрупкое разрушение [40]. Эксперименты показывают, что прочность льда при хрупком разрушении в 4-6 раз меньше, чем при пластическом [41-44]. Физически это объясняется нехваткой времени для развития зоны вязко-пластической деформации и релаксации напряжений в вершинах трещин [45]. Согласно исследованиям [35, 46-50], переход от пластического разрушения льда к хрупкому происходит на скорости деформации около  $10^{-3} \text{ с}^{-1}$ , а предельная скорость, при которой уже происходит деформация льда составляет порядка  $1 \text{ с}^{-1}$  [51]. Поскольку при хрупком разрушении энергия не рассеивается на пластическую деформацию, следовательно, сокращая время удара, можно снизить энергозатраты на освобождение проводов ЛЭП ото льда.

Решая задачу удаления льда, следует учитывать силы его сцепления с проводом [52]. Адгезионная прочность на сдвиг по границе «лед-алюминий» и «лед-нержавеющая сталь» находится в пределах от 0,002 до 1,96 МПа, при этом адгезионная прочность на растяжение по меньшей мере в 15 раз больше, чем на сдвиг [51]. Скорость деформации снижает адгезию. Определенную сложность создает тот факт, что адгезионная прочность на границе «лед-металл» больше,

чем когезионная прочность льда. Этим объясняется остаточный слой льда после сбрасывания основной массы отложения [51]. Чем более тонкий слой льда требуется удалить, тем более высокие ускорения необходимы. Таким образом, именно высокоскоростное воздействие представляет практический интерес для решения проблемы обледенения, а устройство, способное обеспечивать достаточные ускорения, может оказаться эффективным.

Первые попытки при помощи ударов освободить провода от ледяной муфты были связаны с использованием ручного инструмента на изолированной штанге или тросе, обмотанном петлей вокруг провода [18]. Воздействие на провод производилось вручную с земли путем максимально возможного резкого дергания за штангу или трос. Однако, ручной силы недостаточно, чтобы ударить по проводу с достаточной силой и скоростью.

Позже были предприняты попытки усовершенствовать ручной метод: так, было предложено [53] закреплять трос на проводе при помощи специально разработанной головки крюка с молотком, приводимым в действие пневматическим поршнем, заряженным сжатым воздухом. Такое устройство могло приводиться в действие вручную с земли, подъемника или вертолета [54].

Совсем недавно компания Hydro-Québec разработала устройство DAC (De-icer Actuated by Cartridge) для удаления льда ударными волнами [35]. Это портативная цилиндро-поршневая система, активирующаяся при стрельбе пустыми патронами, ударяющая по проводу с высокой скоростью. Сначала при помощи специального метателя на провод ЛЭП забрасывается снаряд, к которому прикреплен трос, затем по тросу к проводу подтягивается DAC. Управление устройством осуществляется с земли (рисунок 6). Для работы такого устройства требуется отключение ЛЭП и выезд бригады.

Известно устройство, вызывающее удар по проводу за счет деформации пьезоэлемента [55]. Недостатком разработки является низкая эффективность из-за малой амплитуды механического воздействия пьезоэлемента.

Целый ряд устройств для удаления льда построен на принципе отталкивания проводников с током под воздействием силы Ампера. Известны разработки

антиобледенительных устройств, где в качестве отталкиваемых проводников используется ИС – две катушки или катушка и боек. Пожалуй, самым ранним упоминанием о разработке на этом принципе действия является устройство [56], содержащее индуктор и фланцы, закрепляемые на паре очищаемых проводов. Индуктор выполнен в виде входящих одна в другую гильз, стянутых упругим элементом. В открытой литературе нет информации об экспериментальных исследованиях этого устройства.



Рисунок 6 – Устройство DAS, размещенное на проводе ЛЭП

Учеными Исследовательского института электроэнергетики (The Electric Power Research Institute, EPRI) в Канаде была опробована экспериментальная установка электроимпульсного антиобледенения (electro-impulse de-icing, EIDI) [57] (рисунок 7).

Исполнительный механизм устройства представляет собой индуктор и прижатый к нему боек, прикрепленный к проводу. При разряде конденсатора через индуктор в нем возникает импульсное магнитное поле, которое индуцирует в бойке вихревые токи. Эти вихревые токи в сочетании с магнитным полем катушки создают кратковременное отталкивающее усилие. Это приводит к созданию резкого изгиба в проводе, который распространяется по ЛЭП, как волна, заставляя лед откалываться от провода в области от 3 до 5 м вокруг исполнительного механизма. Столь маленький радиус распространения

воздействия, вероятно, связан с особенностями крепления исполнительного устройства к проводу (рисунок 8). Однако, отмечена высокая энергоэффективность устройства: мощность в импульсе в тысячи раз больше потребляемой средней мощности системы.

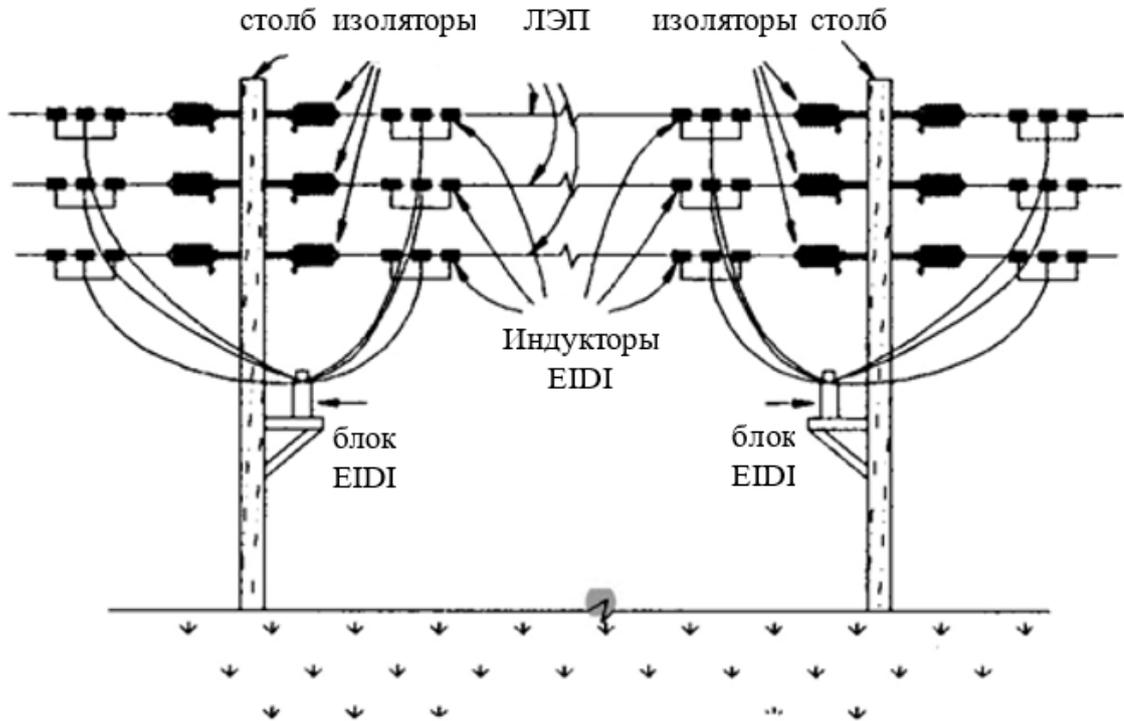
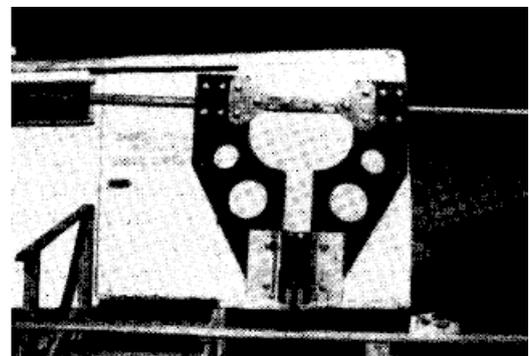


Рисунок 7 – Схема установки EIDI на ЛЭП

Учеными из ОИВТ РАН разработана мобильная установка сбоя гололеда (УСГМ) [58]. Устройство состоит из блока перемещения с установленной в нем электроникой, автономной системой питания всего устройства и электромеханического преобразователя – индуктора с инертной массой (рисунок 9). Вес устройства вместе с аккумулятором составляет около 130 кг.



а



б

Рисунок 8 – Крепление исполнительного механизма EIDI на ЛЭП [57]: а – боковое воздействие; б – крутильное воздействие



Рисунок 9 – Мобильная установка сбоя гололеда

Эксперименты показывают, что устройство за серию импульсов очищает провод от наледи, при этом удельная длина очистки (отношение очищенной длины провода на 1 импульс) с каждым последующим импульсом увеличивается. Это связано с тем, что очищенный от наледи провод имеет более высокую добротность, и волна доходит с минимальными потерями до обледеневшей части, где и происходит поглощение энергии, т.е. разрушение наледи. К недостаткам УСГМ можно отнести то, что индуктор устанавливается на очищаемый провод в непосредственной близости от блока перемещения, который за счет значительной массы шунтирует распространение волны. Это снижает эффективность приведенного способа очистки.

Известно устройство ударно-механической очистки проводов ЛЭП от налипания снега и обледенения [59]. Экспериментальный макет устройства (рисунок 10) содержит силовой трансформатор 1, опорные изоляторы 2, между которыми натянут провод 3, трансформатор тока 4, блок управления 5, якорь в форме медного диска 6, ударный диск 7, индуктор 8, крепежный элемент 9, пружину 10, каркас 11. Вторичная обмотка силового трансформатора 1 последовательно соединена с трансформатором тока 4 и проводом 3, обеспечивает ток «в проводе» на уровне 0-40 А. Трансформатор тока 4 обеспечивает блок управления 5 зарядным напряжением  $U_0$  для системы

мониторинга и заряда емкостного накопителя энергии, которые находятся внутри блока управления. Выполненный в форме медного диска якорь 6 соединен с ударным диском 7 и посредством элемента 9 жестко крепится к проводу 3 в середине пролета. Блок управления 5 осуществляет контроль показателей влажности и температуры окружающей среды. Пружина 10 прижимает якорь 6 к индуктору 8, обеспечивая его аксиальное перемещение с возвратом в исходное положение.

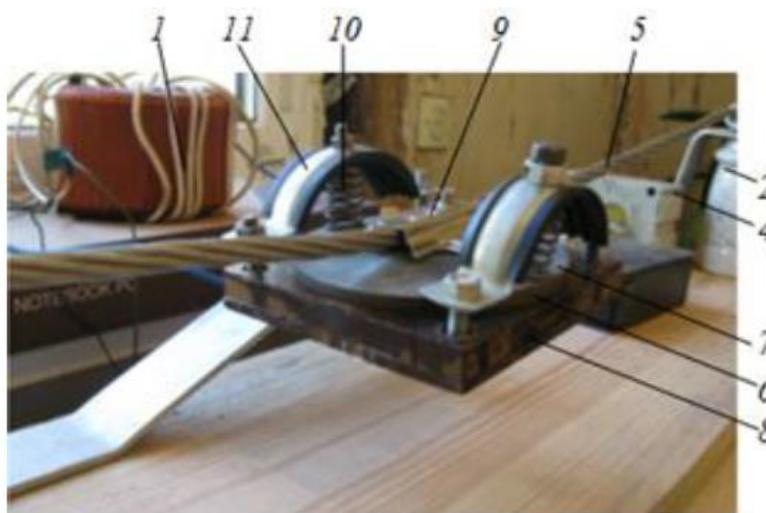


Рисунок 10 – Устройство ударно-механической очистки проводов ЛЭП

В натуральных экспериментах использовался провод АС-90 длиной 28 м. Устройство позволило эффективно избавиться от уже сформированного обледенения толщиной 2-5 мм. Частота работы устройства составляет 1 удар в 4 минуты, с расчетной величиной электродинамического усилия 16 кН. В источнике не приведена масса устройства, не указана амплитуда колебаний провода, таким образом, сложно оценить применимость разработанного макета для эксплуатации в реальных условиях.

Во всех приведенных разработках сила Ампера действуют на боек или катушку, толкающую провод. Отсутствие электрического контакта с проводом ЛЭП является преимуществом данного типа устройств. Однако, известно и такое изобретение, работа которого основана на возникновении силы взаимодействия постоянных магнитов устройства и провода ЛЭП, по которому протекает переменный ток [59]. Кроме электрического контакта с проводом, к недостаткам разработки следует отнести непрерывность ее работы.

Для всех ударных механизмов борьбы с гололедом на ЛЭП значительную сложность составляет задача распространения ударного импульса по всей длине пролета. Решение этой проблемы предлагается в изобретениях, вызывающих вибрацию проводов. Так, ряд изобретений предполагает пропускание по двойным или кратным проводам постоянного, переменного или импульсов тока. При частоте тока, близкой или кратной собственной частоте колебания проводов, возникает резонанс, позволяющий раскачать провода с амплитудой, достаточной для удаления льда [60], в том числе, за счет соударения проводов [61, 62]. Эти методы могут вызывать усталостное разрушение проводов, арматуры и изоляторов, поскольку предполагают резонансные колебания проводов достаточно больших амплитуд.

Другой вариант устройства на принципе действия силы Ампера состоит в подаче импульса тока на медные жилы, намотанные на провода ЛЭП [57]. При этом медные жилы отталкиваются друг от друга, за счет чего провод ЛЭП колеблется и ломает лед. Несмотря на то, что такой метод позволяет удалять лед по всей длине пролета и не зависит от свойств провода, сложность его реализации заключается в намотке жил вокруг провода, проблеме молниезащиты и изоляции. Это не позволило придать методу практической реализации.

Таким образом, подходы ударного и вибрационного освобождения проводов ЛЭП от намерзшего льда имеют свою историю. Энергоэффективность этих подходов обоснована хрупкостью льда при высоких скоростях воздействия. Ударные методы имеют преимущество перед вибрационными в связи с возможностью минимизировать негативные последствия колебаний. Снижению износа элементов конструкции ЛЭП от действия ударного устройства способствует естественное гашение бегущей волны за счет диссипативных сил, а также за счет гасителей вибрации, расположенных на концах пролета. На основании проведенного обзора, сформулированы основные задачи, которые необходимо решить при проектировании устройства, реализующего ударный способ:

– создание условий отделения льда в месте удара. В основе данной задачи лежит многокритериальность процесса удаления, зависящего как от внешних условий (например, температура окружающей среды и провода, структура льда, упругие и жесткостные свойства провода), так и от параметров воздействия;

– создание условий отделения льда по всей длине пролета. Данная задача обусловлена затуханием ударного воздействия по мере удаления от места приложения нагрузки;

– недопущение колебаний, способствующих разрушению провода. К таким колебаниям относятся:

- вибрация проводов (в иностранных источниках – эолова) – наиболее распространенный и опасный вид колебаний, возникающий при синхронизации частоты срыва вихрей ветрового потока за проводом с одной из его собственных частот. Частота срыва может лежать в диапазоне от 3 до 150 Гц при сравнительно небольших амплитудах колебаний (относительно диаметра провода) в вертикальной плоскости и длине волны от 1 до 20 м. Образующаяся стоячая волна приводит к повреждениям проводов вблизи натяжных, поддерживающих и спиральных зажимов вследствие усилия сдавливания при фиксации и деформации провода из-за изгиба вблизи узла крепления, что является причинами его усталостного разрушения [63].

- пляска проводов (в иностранных источниках – галопирование) – устойчивые периодические низкочастотные (0,2-2 Гц) колебания с односторонним или асимметричным отложением гололеда (мокрого снега, изморози, смеси), возникающие при скорости ветра 3-25 м/с и образующие стоячие волны (иногда в сочетании с бегущими) с числом полуволн от одной до двадцати и амплитудой 0,3-5 м [3].

Задачи, связанные с разрушением и удалением сформировавшейся ледяной муфты, описанные выше, могут быть упрощены и решены путем своевременного предупреждения ее образования. В этом случае удалению подвергаются капли воды. Как известно [64], для отделения воды от твердой поверхности необходимо совершить работу для преодоления сил адгезии. При переходе воды в твердую

фазу, сила ее сцепления с поверхностью характеризуется адгезионной прочностью. В этом случае внешнее усилие, или работа отрыва, тратится не только на преодоление сил адгезии, но и на побочные процессы. Работа, затрачиваемая на разрушение адгезионного слоя льда, представляет собой сумму работ адгезии и деформации адгезионного слоя [65]. То есть удаление незамерзшей воды ударным способом энергетически более выгодно, чем удаление льда.

#### **1.4 Кинетика кристаллизации воды на поверхности провода**

Для определения требований к режиму работы устройства по предупреждению образования наледи на проводах – началу и периодичности срабатывания – необходимо изучить процесс замерзания капель воды, его скорость и условия.

Лед на проводах образуется в результате осаждения переохлажденных капель дождя, мороси и тумана. В [66] описаны два основных механизма образования замерзающих осадков: классический и альтернативный. Классический механизм замерзания происходит вследствие таяния снежинок, падающих из верхнего холодного слоя облака в теплый слой и затем охлаждающихся ниже  $0^{\circ}\text{C}$  в нижележащем холодном слое, после чего они выпадают в виде переохлажденных капель. При альтернативном механизме, получившем название «процесса переохлажденного теплого дождя», замерзающие осадки могут формироваться в результате столкновения и слияния облачных капель при слабо отрицательной температуре. Исследованию разновидностей обледенения проводов и их связи с атмосферными процессами посвящена работа [67]. По данным Дебальцевской гололедной станции [68], на долю процессов кристаллизации приходится 96 %, а на долю процессов десублимации – 4 % массы льда, отлагающегося на проводах. Таким образом, значение переохлажденной воды в обледенении проводов весьма велико.

Состояние жидкой воды на обтекаемой поверхности зависит главным образом от материала и температуры поверхности. Если температура обтекаемой поверхности выше температуры отвердевания воды, то кристаллизация воды, как

механизм образования гололеда, не происходит [27, 68]. Для предотвращения образования льда достаточно, чтобы температура провода была не ниже  $2^{\circ}\text{C}$  [69]. В этом случае замерзшая доля равна нулю, а вода существует на поверхности в виде капель, пленки или ручейков. Лед либо не образуется, либо тает. Такой режим называется жидким. Влажный режим отличается температурой обтекаемой поверхности, равной температуре затвердевания воды, и замерзшей долей, изменяющейся от нуля до единицы. Кроме этого существует третий режим нарастания льда – сухой, отличающийся от влажного режима отсутствием жидкой воды на поверхности обледенения и температурой поверхности ниже температуры затвердевания воды.

Таким образом, если установившееся значение температуры провода ниже температуры замерзания воды или близко к ней, то велика вероятность обледенения. Это значение зависит от температуры воздуха, скорости ветра и силы тока. Рассчитаем режимы работы, при которых возрастает риск обледенения, на примере марки АС120/19 по методике [70]. За максимально допустимую принята температура провода  $90^{\circ}\text{C}$  [33]. Поскольку максимально допустимый ток тем выше, чем больше скорость ветра и ниже температура окружающей среды, так что при любой температуре воздуха допустимая температура провода является заданной величиной, то мы получаем зависимость температуры провода только от значения протекающего тока при заданной температуре воздуха. Для удобства сравнения ток приведен в процентном отношении, где за 100 % принят максимально допустимый ток при данной температуре (рисунок 11).

Таким образом, для провода АС120/19 при нагрузке в два и более раз ниже предельно допустимой происходит снижение температуры провода до значений, при которых возрастает риск гололедообразования.

Величина ледяных отложений и интенсивность процесса гололедообразования зависят от многих факторов, но в первую очередь от содержания воды в единице объема воздуха – влажности, температуры воздуха, размеров водяных капель, скорости, с которой капли приближаются к проводу, угла встречи капель с

поверхностью провода, наличия уже отложившегося льда и температуры его поверхности, продолжительности процесса [68, 71]. В гидрометеорологии интенсивность обледенения принято измерять в миллиметрах в минуту (мм/мин). Под слабым обледенением подразумевают интенсивность до 0,5 мм/мин, умеренным – от 0,5 до 1,0 мм/мин, сильным – от 1,0 до 1,5 мм/мин, очень сильным – свыше 1,5 мм/мин.

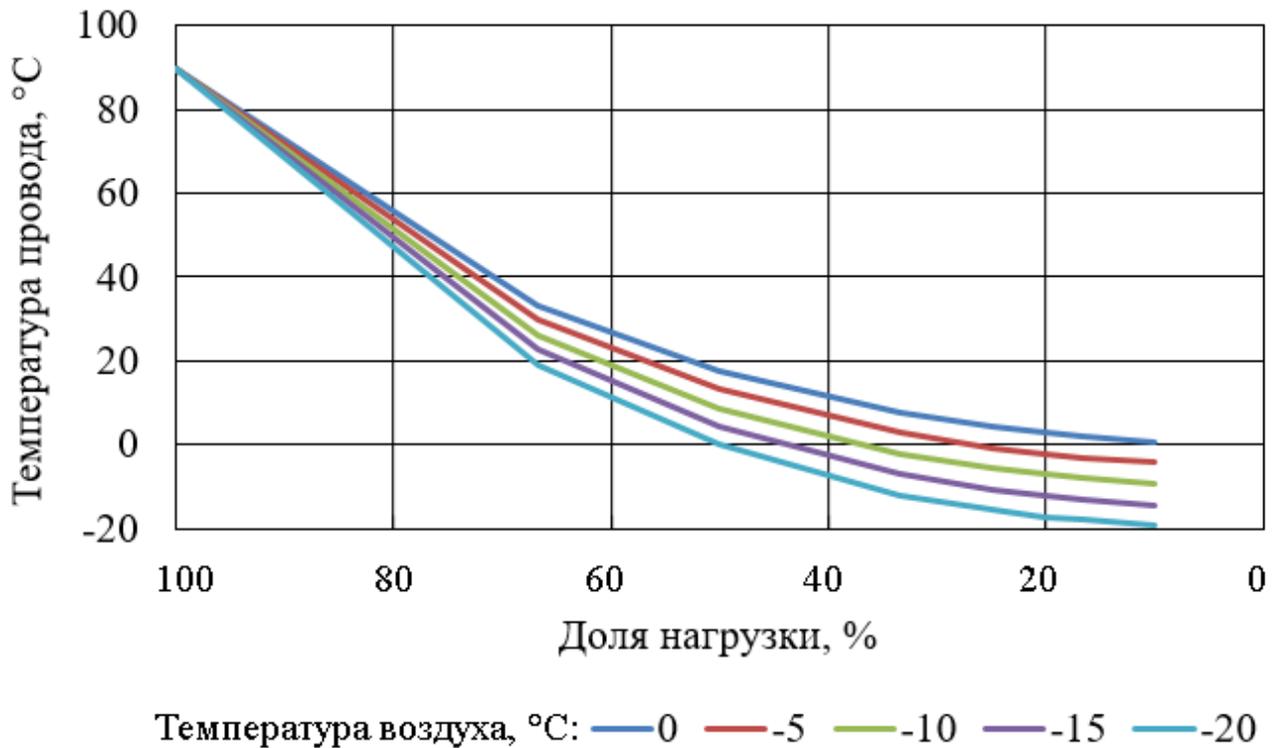


Рисунок 11 – График зависимости температуры провода АС120/19 от доли допустимой нагрузки

Как показывают многочисленные наблюдения, наихудшие условия для возникновения обледенения наблюдаются в диапазоне температур от 0 до -20°C и в особенности от 0 до -10°C [72]. В работе [27] установлено, что для однозначного ответа на вопрос о наличии или отсутствии процессов гололедообразования достаточно знать температуру провода, а также относительную влажность и температуру воздуха. Установлен вид зависимости между интенсивностью нарастания массы отложений, точкой росы, точкой десублимации и температурой провода.

Рассмотрим этапы процесса гололедообразования [11]. Первый этап – столкновение капель с объектом обледенения. Он характеризуется

эффективностью столкновения (коэффициентом захвата) – долей каплей, движущихся в направлении объекта обледенения и сталкивающихся с ним. Этот параметр зависит от размера и формы частиц, скорости воздушного потока, размера и формы объекта обледенения. Для замерзающего дождя или мокрого снега эффективность столкновения оценивается равной единице.

Второй этап – удержание капли на поверхности обледенения. Он характеризуется эффективностью прилипания – совокупным объемом воды, покидающей поверхность. Когда капля переохлажденной воды попадает на холодную сухую поверхность, она быстро замерзает и, как правило, не отскакивает. Когда на поверхности находится слой жидкости, капля также не отскакивает, однако некоторая ее часть покидает поверхность. Хотя сухой снег имеет эффективность прилипания практически равную нулю, известны исследования, когда при скорости ветра менее 2 м/с сухой снег оседал на проводах ЛЭП, вследствие чего образовывалась цилиндрическая муфта. Как правило, нагрузка от сухого снега не бывает большой по сравнению с нагрузками от мокрого снега. Во-первых, поток снега к проводу относительно мал при низких скоростях ветра, необходимых для прилипания сухого снега. Во-вторых, плотность отложений сухого снега обычно составляет менее 0,1 г/см<sup>3</sup>. Эта низкая плотность связана с небольшой прочностью сцепления, которая приводит к легкому отсоединению сухих отложений снега. Следовательно, опасные сочетания высокой снеговой нагрузки и высокой скорости ветра не возникают при сухом снеге. Когда на поверхности частиц снега есть жидкость, они прилипают более эффективно, так что при малых скоростях удара, благоприятной температуре и влажности эффективность прилипания близка к единице. Приблизительные методы для оценки эффективности прилипания включают эмпирические уравнения, основанные на лабораторном моделировании и некоторых полевых наблюдениях. Для цилиндрических тел эффективность прилипания может быть оценена как обратно пропорциональная скорости ветра.

Третий этап – процесс замерзания поверхностной капли, он в свою очередь делится на несколько этапов [73]: зарождение микрокристаллов льда, затем

относительно быстрое образование структуры лед-жидкость с переходом в состояние термодинамического равновесия около температуры затвердевания (например, на алюминиевой пластине температурой  $-10^{\circ}\text{C}$  для переохлажденной капли этот этап длится около 0,05 с). После этого наступает более медленный процесс полного замерзания капли (например, на той же алюминиевой пластине этот этап длится около 2,5 с). Таким образом, происходит относительно быстрое затвердевание части капли, обуславливающее нагрев переохлажденной жидкости до температуры затвердевания и последующий (более медленный) процесс замерзания оставшейся жидкой части. Другие исследования [74] подтверждают, что замерзание капли воды  $0^{\circ}\text{C}$  на поверхности с отрицательными температурами происходит в течение нескольких секунд. Однако, чем крупнее капли, тем медленнее они замерзают. Также замедляет процесс замерзания слияние осевших капель с вновь выпадающими. Это объясняется их недостаточным переохлаждением и большим выделением скрытой теплоты, за счет чего повышается температура замерзающей воды нередко до  $0^{\circ}\text{C}$ . Поэтому в условиях переохлажденного дождя скорость нарастания льда обычно составляет несколько минут. Так, для цилиндра диаметром 0,05 м при скорости набегающего потока 70 м/с за 12 минут образуется лед толщиной 1,5 мм (во влажном режиме) и 0,45 мм (в сухом режиме) (численные исследования [73]); для цилиндра при температуре  $-15^{\circ}\text{C}$  и скорости набегающего потока 5 м/с за 10 минут образуется лед толщиной 2 мм (численные исследования [73]); для алюминиевой подложки, расположенной вертикально, при температуре  $-11^{\circ}\text{C}$  и скорости набегающего потока 80 м/с за 2 минуты образуется барьерный лед (экспериментальные исследования [75]).

Таким образом, процесс образования льда является сложным и многоэтапным, зависящим от многих факторов. Замерзание воды на проводах начинается, когда их температура опускается ниже температуры замерзания воды, что зависит от параметров окружающей среды и тока нагрузки. Чем ниже температура провода (или другой подложки) при прочих равных условиях, тем быстрее намерзают новые слои. На образование первого тонкого слоя льда (1,5-2 мм) требуется несколько минут в зависимости от скорости ветра, температуры окружающей

среды и провода, режима замерзания (сухой или влажный). Откуда следует, что при температуре провода близкой к нулю важно не допустить перехода водяной пленки в состояние льда, что можно обеспечить посредством ее ежеминутного удаления стряхиванием.

### **1.5 Подходы к математическому моделированию динамики провода**

Для определения требований к параметрам работы устройства по предупреждению образования наледи на проводах – силе и времени воздействия, направлению и месту приложения нагрузки – необходимо изучить реакцию провода на удар.

При импульсном приложении нагрузки в любой системе, в том числе проводе, происходит удар. Движение начинается в точке приложения мгновенного возмущения и лишь постепенно распространяется по проводу. При этом образуется бегущая волна деформации. Скорость распространения волны деформации и ее форма (крутизна) зависят от параметров системы (от соотношения распределенных масс и упругости, иными словами от соотношения собственных частот нормальных форм и времени приложения внешней нагрузки) [76].

Математическое моделирование удара по проводу, представляющему собой металлический трос, является нелинейной задачей. Это связано со значительным искажением его формы в процессе деформирования [77]. Расчетную схему в этом случае нельзя считать плоской, что приводит к необходимости рассмотрения пространственной задачи. При ударе возникает высокочастотный волновой процесс, когда длина волны становится сравнимой с диаметром поперечного сечения стержня и система характеризуется скачками значений ускорения. Известно [78-82], что высокочастотные продольные, крутильные и изгибные волны обладают дисперсией. Для их описания технических теорий уже недостаточно, и требуется применение уточненных стержневых моделей.

Задачи по определению напряженно-деформированного состояния (НДС) стальных канатов имеют свою богатую историю, которая относится к механике

тонких стержней и жестких нитей и начинается с конца XVII века. Основателями теории являются Г. Галилей, Я. Бернулли, Л. Эйлер, Д. Бернулли, Ж. Даламбер, Ж. Лагранж. Важное место в формулировке и решении проблем механики стержней занимают работы Тимошенко С.П., Болотина В.В., Жилина П.А., Слепяна Л.И. Значительный вклад в развитие теории гибких нитей внесли Меркин Д.Р., Пановко Я.Г., Бидерман В.Л., Качурин В.К., Мацелинский Р.Н., Перельмутер А.В. и другие.

Балки, струны, цепи, канаты, тросы – для всех этих объектов применяется теория стержней с различными допущениями, в зависимости от того, какая конструкция моделируется. Металлические тросы, в отличие от стержней имеют меньший модуль упругости, таким образом, их относительное удлинение оказывается значительно большим [77, 83]. В тонких стержнях, не обладающих гибкостью, существенна роль изгибных напряжений, которые препятствуют изменению формы [79]. Считается, что изгибной жесткостью можно пренебречь в случае сильного натяжения (акустические струны, ванты), но изгибная жесткость становится более важна в случаях низкого натяжения (провода ЛЭП, канатные дороги). Однако это верно только в глобальном смысле. Некоторые авторы пренебрегают жесткостью на изгиб, в то время как другие включают свойства жесткости и демпфирования на основе оценок и приближений к своим моделям. При пренебрежении жесткостью на изгиб элемента, его вращательные степени свободы в узлах исчезают, а боковое поведение кабеля исключается из системных уравнений.

К сожалению, общих критериев применимости уточненных теорий не существует, поскольку многое здесь определяется строением рассматриваемого стержня и параметрами изучаемой нагрузки. Например, для тонких стержней, выполненных из однородного материала – например, стали – как правило, можно пренебречь инерцией вращения и деформацией поперечного сдвига. Однако для тонких стержней с малой жесткостью на поперечный сдвиг подобные упрощения недопустимы. Для моделирования медленных процессов в тонких стержнях может быть применима модель стержня Бернулли-Эйлера, однако, если

необходимо рассматривать высокочастотные воздействия на стержень, то лучше использовать модель балки Тимошенко, учитывающую как деформацию поперечного сдвига, так и инерцию вращения. Классическую теорию Д. Бернулли, принятую при описании продольных колебаний стержня, обобщают модели Релея-Лява (учет кинетической энергии поперечных движений частиц стержня), Бишопа (учет еще и потенциальной энергии сдвиговых деформаций), Миндлина-Германа (свобода от гипотезы об одноосности деформированного состояния стержня), Коссера-Тимошенко (учет жесткости на изгиб, сдвиг и растяжение) и другие. Известна модель пространственного криволинейного тонкого упругого стержня Левина В.Е. и Пустового Н.В., находящегося под действием приложенной нагрузки. Модель используется для расчетов стержней с произвольной геометрией (изломы, скачки кривизны) и большими перемещениями. Модели цепной линии и упругой цепной линии [84-86] используются в расчетах подвесных канатных дорог и канатно-трелевочных установок [87-89].

Одним из эффективных методов изучения динамики тросов является теория колебаний и волн. основополагающие результаты в области теории распространения волн в гибких нитях и канатах принадлежат профессору Рахматулину Х. А. В сороковых годах XX века им были получены основные уравнения движения нити. Рахматулиным, а также его учениками и последователями исследована динамика троса при отсутствии натяжения и с заданным натяжением, бесконечного троса и троса заданной длины, при ударе с неизменной и изменяемой скоростью, то есть телом конечной массы, а также телом заданной формы.

Рахматулин показал, что форма троса при квазистатическом точечном воздействии отличается от динамического (рисунок 12) [90]. При квазистатическом воздействии небольшое отклонение троса, как видно из рисунка, приводит к возникновению большой силы натяжения  $N$ , ориентированной по направлению троса. При этом сила  $F$ , действующая на отклоняющееся трос тело, будет значительно меньше. Если же скорость удара

достаточно высока, так что за время действия удара изгиб провода не успевает достигнуть концов пролета, то схема действующих сил меняется (рисунок 12). Изгиб троса распространяется со скоростью поперечной волны  $b$ . Тангенс угла отклонения  $\theta$  пропорционален скорости удара  $V$ , при этом сила  $F$ , действующая на отклоняющееся трос тело, может существенно превосходить силу натяжения троса и будет тем больше, чем больше скорость.

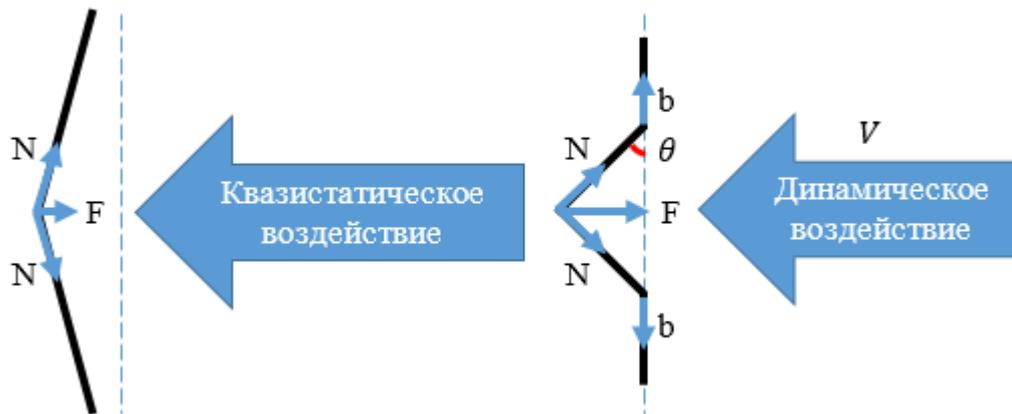


Рисунок 12 – Схема сил при точечном квазистатическом и динамическом воздействии

Относительно проводов ЛЭП ранее исследовался ряд задач. Так, задача о нагружении периодической равномерно распределенной по пролету поперечной нагрузкой решена в работе [13], где используется модель стержня малой изгибной жесткости, свободно опертого на несближающиеся опоры. Колебания обледеневших проводов под действием аэродинамических сил подробно изучены в [63]. В работе [91] рассмотрена задача об аэродинамической нагрузке и импульсном нагружении потоком ветра (порыв ветра). Автором [92] разработан метод вычисления конечной линии равновесия стального стержня после удара при больших отклонениях от первоначального равновесного состояния. В работе [93] дано решение задачи распространения волн и колебаний в тяжелых канатах. Тем не менее, в предыдущих работах не был исследован боковой удар по весоному тросу присоединенным телом в направлении, перпендикулярном действию силы тяжести. Кроме этого, не исследовалась динамика троса с учетом возвратного движения ударяющего тела.

Проведенный обзор подходов к математическому моделированию провода ЛЭП показал, что ввиду сложности поставленной задачи для ее решения целесообразно применять приближенные численные методы.

### **1.6 Цели и задачи исследования**

Недопущение аварий по причине гололеда на проводах – конечная стратегическая цель энергетических компаний, для достижения которой требуется комплексное решение целого спектра задач: прогнозирование, мониторинг, предупреждение обледенения проводов ЛЭП и борьба с гололедом. Сформулированы критерии эффективности решения для борьбы с гололедом как комплекса пассивных мер (прогноз, мониторинг) и активных мер (предупреждение и удаление гололеда). Среди пассивных мер на сегодняшний день уже разработаны и частично внедрены решения, способствующие раннему обнаружению гололедоопасной обстановки и мониторинга обледенения проводов. Это является основой для внедрения решения, способного в автоматическом режиме предупреждать образование льда на проводах ЛЭП, что энергетически более выгодно, чем удаление образовавшейся наледи.

Можно предположить, что короткий удар по проводу при помощи специального устройства, которое прикреплено к нему и по окончании действия удара возвращается в исходное положение, вызовет распространение бегущей волны в обе стороны от устройства. Амплитуда такой волны будет пропорциональна времени удара, и, следовательно, небольшой относительно диаметра провода. Высокие скорости воздействия будут создавать знакопеременные ускорения большой величины, то есть усилия между проводом и водной массой, осевшей на нем, на чем может быть основано удаление последней с провода с целью предупреждения обледенения. В связи с отсутствием работоспособного устройства на ударном принципе действия, обоснована необходимость его разработки.

Исходя из вышеизложенного, сформулирована цель диссертационной работы: повышение энергоэффективности борьбы с обледенением проводов ЛЭП

посредством предотвращения гололедных аварий ударным методом с применением электромеханического преобразователя в качестве исполнительного механизма.

Для реализации поставленной цели требуется решить следующие задачи:

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

2. 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.

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

## ГЛАВА 2 ПОСТРОЕНИЕ СХЕМНОГО РЕШЕНИЯ

### 2.1 Постановка задачи

Заменяем провод ЛЭП эквивалентной моделью – гибкой, линейно упругой весомой нитью, находящейся в растянутом состоянии. Подразумевается, что нить не сопротивляется сжимающей нагрузке. Напряжения, возникающие в ней в любой момент времени, направлены по касательной к её мгновенному профилю, т.е. нить не сопротивляется изгибу, она не может создавать моменты. Нить длиной  $L$  имеет натяжение  $N$ , незначительно превышающее ее вес, равномерно распределенный по всей длине, за счет чего она провисает по некоторой кривой, подчиняясь растяжению по закону Гука.

Пренебрегая смещениями концов нити, запишем граничные условия (1)

$$z(-L_1, t) = z(-L_2, t) = 0, \quad (1)$$

где  $L_1, L_2$  – точки закрепления нити,  $Oz$  – ось, направленная вдоль поперечного движения частиц нити. Тогда уравнение поперечных колебаний нити (2)

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = b^2 \frac{\partial^2 z}{\partial x^2}, \quad (2)$$

где  $Ox$  – ось, направленная вдоль нити,  $b$  – скорость распространения поперечных колебаний, равная (3)

$$b = \sqrt{\frac{N}{p}}, \quad (3)$$

где  $p$  – погонная масса провода. Собственная частота колебаний  $n$ -ой гармоники (4)

$$\nu_n = \frac{n}{2L} \sqrt{\frac{N}{p}}. \quad (4)$$

При известной частоте колебаний можно вычислить длину бегущей волны (5)

$$\lambda = \frac{b}{\nu}. \quad (5)$$

Рассмотрим задачу нанесения удара по центру нити присоединенным телом конечной массы  $m$  шириной  $2\delta$  с начальной скоростью  $V_0$  (рисунок 13).

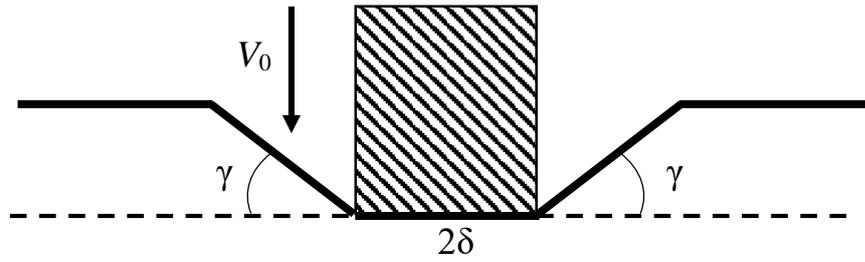


Рисунок 13 – Схема динамического воздействия тела на нить

Задачу для определения поперечных составляющих реакции провода на удар до момента падения скорости до нуля сформулируем следующим образом (6)

$$\frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = \frac{N}{p} \frac{\partial^2 z}{\partial x^2},$$

$$z(-L_1, t) = 0; z(L_2, t) = 0, \quad (6)$$

$$z(x, 0) = 0; \frac{\partial z}{\partial t}(x, 0) = 0,$$

$$z(\pm\delta, t) = \int_0^{t_1} v(t) dt.$$

Решение данной задачи традиционными методами математической физики дано в работе [93].

Провод оказывает сопротивление движению присоединенного тела. Эта сила зависит от натяжения  $N$  и углов наклона провода  $\gamma_1, \gamma_2$  в местах примыкания. Уравнение движения присоединенного тела является условием согласования для провода в период воздействия [93] (7)

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = N(\sin \gamma_1 + \sin \gamma_2). \quad (7)$$

При условии равенства углов выражение (7) преобразуется в (8)

$$m \frac{dV}{dt} = 2N \sin \gamma. \quad (8)$$

Синус угла наклона провода в местах примыкания к бойку определим как (9)

$$\sin \gamma = \frac{z}{\sqrt{z^2 + (bt)^2}}. \quad (9)$$

Дальнейшее движение провода обусловлено действием возвратной пружины устройства. Решение, полученное на предыдущем шаге, служит начальными условиями для движения в обратную сторону (10)

$$\frac{\partial^2 Z}{\partial t^2} = \frac{N}{p} \frac{\partial^2 Z}{\partial x^2},$$

$$Z(-L_1, t) = 0; Z(L_2, t) = 0, \quad (10)$$

$$Z(x, 0) = z(x, t_1); \frac{\partial Z}{\partial t}(x, 0) = \frac{\partial z}{\partial t}(x, t_1),$$

$$Z(\pm \delta, t) = \int_{t_1}^{t_2} V(t) dt .$$

## 2.2 Обоснование исполнительного механизма ударного устройства

Ударный метод для предупреждения гололедообразования предполагает импульсное воздействие в локальной области провода, в результате которого в обе стороны от места удара по проводу распространяется возмущение. Исполнительные механизмы ударных устройств, которые рассматривались разработчиками применительно к борьбе с гололедом на ЛЭП, сводятся к одной из систем: механической, пневматической либо электромеханической. Непосредственное преобразование электрической энергии в возвратно-поступательное движение с помощью импульсных электромеханических преобразователей, представляющих собой самостоятельный класс электрических машин, дает такие известные преимущества, как конструктивная простота, достижение больших ускорений и замедлений без износа механических частей, большие возможности автоматизации технологических процессов, невысокие массогабаритные показатели и другое [94]. Импульсные электромеханические преобразователи применяются в технологических аппаратах, требующих кратковременного силового воздействия на обрабатываемый материал, т.е. в молотах, прессах, насосных и компрессорных установках, в источниках для невзрывной сейсморазведки, бурении и др. Кроме того, они могут с успехом

использоваться в процессах, где необходимо получать высокое быстродействие – в переключающих и замыкающих механизмах, клапанах и т.д.

В зависимости от принципа действия, определяющего конструктивные особенности и технические возможности, линейные импульсные электромеханические преобразователи подразделяются на виды: индукционно-динамические двигатели (ЛИДД), магнитоэлектрические двигатели (ЛМЭД), магнитострикционные двигатели (ЛМСД), электрострикционные двигатели (ЛЭСД), электродинамические двигатели (ЛЭДД), электромагнитные двигатели (ЛЭМД). Простота конструкции ЛИДД, скорость срабатывания  $1 \cdot 10^{-3}$  с на длине хода до 50 мм при КПД до 50 % [94], большая начальная скорость, высокая стабильность механических характеристик [95] выгодно отличают его не только от гидравлических, пневматических, пиропатронных ударных механизмов, но и от многих видов линейных электрических двигателей. К недостаткам ЛИДД относятся наличие импульса электромагнитных помех при срабатывании устройства, ограниченный срок службы узла индуктора, а также сильная зависимость скорости метания от электропроводности материала, из которого изготовлено метаемое тело.

Следует особо подчеркнуть, что до настоящего времени нет установившегося названия для ЛИДД. В литературе встречаются термины «индукционно-динамический механизм» [95], «магнитно-импульсный привод» [96, 97], «линейный электромеханический преобразователь» [98], «линейный импульсно-индукционный электромеханический преобразователь» (ЛИИЭП) [99]. В данной работе применительно к рассматриваемому устройству будем использовать последний из перечисленных терминов как отражающий принцип действия, а также пространственные и временные свойства механического движения.

Работа ЛИИЭП основана на явлении отталкивания двух проводников под воздействием силы Ампера, возникающей при разряде накопителя энергии на ИС – индуктор и боек (11)

$$F_{12} = \frac{\mu_0 \mu}{4\pi} \frac{2i_1 i_2}{r} l, \quad (11)$$

где  $i_1$  – ток, протекающий в индукторе,  $i_2$  – ток, наведенный в проводящей пластине (бойке),  $l$  – длина провода спирали индуктора,  $r$  – расстояние между индуктором и бойком.

В состав ЛИИЭП кроме ИС входят: накопитель энергии (импульсный конденсатор) и коммутирующее устройство. Индуктор может представлять собой плоскую катушку, а боек – диск из электропроводного материала (рисунок 14). Когда по индуктору протекает импульс тока, возникает переменный по величине магнитный поток, который сцепляется с бойком – короткозамкнутым контуром, гальванически не связанным с индуктором. В результате наведенная э.д.с. создает в бойке ток, направленный навстречу току в индукторе. Между контурами, по которым протекают токи в противоположных направлениях, возникает сила Ампера, стремящаяся отбросить их друг от друга. При этом величина силы Ампера определяется скоростью нарастания тока в индукторе.

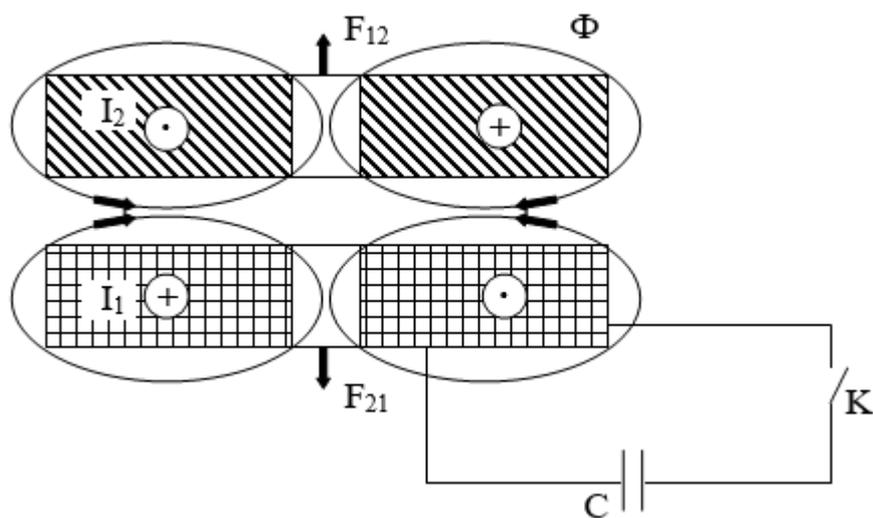


Рисунок 14 – Схема индукторной системы

Устройства, работающие на данном принципе действия, используются для разгона индеторов из неподвижного состояния до высокой скорости. Установки для метания тяжелых объектов (десятки килограмм), известны как индукционно-динамические ускорители (ИДУ) [100-103], для разгона легких объектов (несколько грамм) – как магнитно-импульсные метательные установки (МИМУ) [104]. ЛИИЭП находят свое применение в сфере обработки металлов давлением

[104], при разрушении сводов и очистке оборудования [96, 105], в том числе, ото льда [106], в других областях науки, техники, безопасности и обороны [107-110].

Применительно к предупреждению гололеда на проводах ЛЭП [111], использование ЛИИЭП в качестве исполнительного механизма, обеспечивает преимущества:

- соответствие параметров удара расчетным значениям в диапазоне сотен микросекунд и тысяч ньютонов. Параметры удара зависят от конструктивных, массогабаритных и электрических характеристик ИС;

- достижение высоких ускорений: за счет того, что механизм реагирует на величину скорости нарастания тока  $di_1 / dt$ . Чем выше скорость  $di_1 / dt$ , тем больше э.д.с., наводимая в бойке, тем больше в нем ток  $i_2$ , следовательно, тем выше сила отталкивания  $F_{12}$  бойка от индуктора;

- управляемость ИС, которая заключается в возможности регулировки силы удара путем изменения напряжения заряда. Это обеспечивает универсальность устройства применительно к различным пролетам;

- отсутствие электрического контакта с проводом ЛЭП. Питание устройства может осуществляться бесконтактным способом от провода, по принципу токовых клещей;

- отсутствие сложных кинематических связей и передающих механизмов для преобразования силы Ампера в линейное движение между бойком и проводом. Единственным связующим механизмом должна быть штанга. Соединение штанги и провода должно быть жестким. Это обеспечит полную передачу механического воздействия, которое генерирует индукторная система, а также исключит превышение допустимых нагрузок;

- невысокие массогабаритные характеристики изделия относительно пролета ЛЭП.

### 2.3 Аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в электромеханическом преобразователе

Устройство для предупреждения образования льда на проводах должно обеспечивать с одной стороны достаточное ускорение и амплитуду воздействия, с другой – не допускать негативных последствий колебаний, таких как пляска проводов, вибрация или превышение допустимых нагрузок. Поэтому требуется рассчитать и проанализировать электромеханические процессы, происходящие при разряде накопителя энергии на ИС. Эти процессы определяются параметрами электромеханической установки: габаритами ИС, материалами из которых она выполнена, емкостью конденсаторов и напряжением заряда, а также силой сопротивления движению ИС.

Будем рассматривать ЛИИЭП, ИС которого представляет собой плоский индуктор и боек из электропроводного материала (рисунок 15).

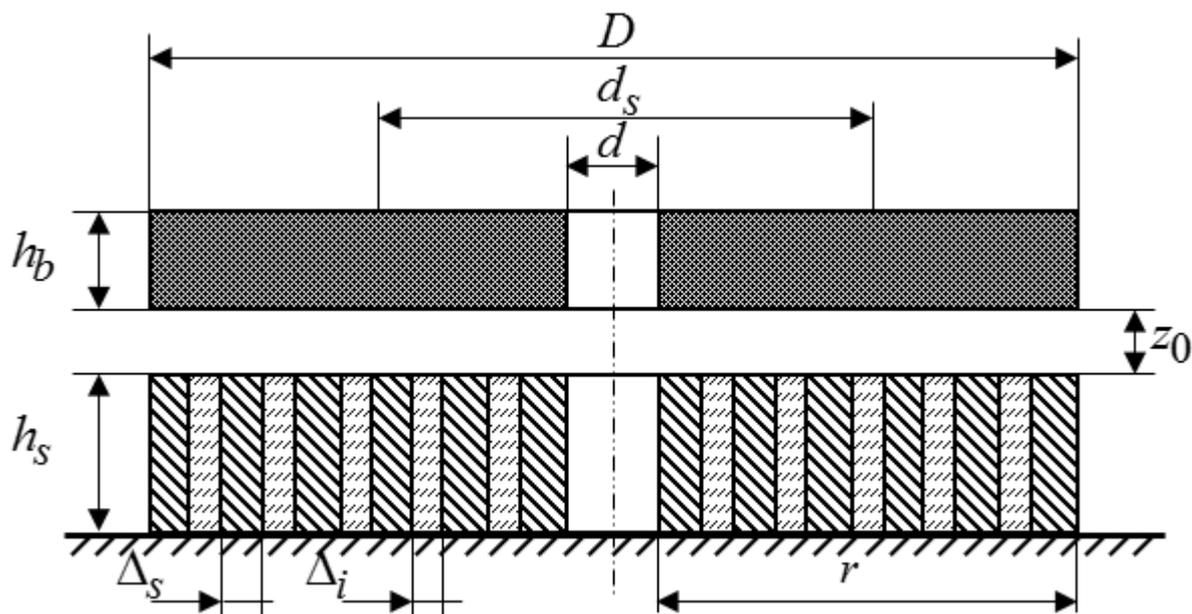


Рисунок 15 – Основные геометрические характеристики ИС

Плоский индуктор – это спиральная катушка индуктивности, залитая или запрессованная высокопрочным изоляционным материалом. Индуктор имеет дисковую форму и намотан медной шиной шириной  $\Delta_s$  и высотой  $h_s$ . Витки обмотки индуктора отделены изоляционным слоем шириной  $\Delta_i$ . Боек имеет высоту  $h_b$ .

Переходные электромагнитные и электромеханические процессы при разряде высоковольтных конденсаторных батарей рассмотрены в работах [96, 97, 103, 110] и других, где для расчетов применены подходы теории поля или теории электрических цепей.

Построим аналитическую модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП устройства для предупреждения образования наледи [112, 113]. Для этого воспользуемся методом теории электрических цепей и представим ИС в виде двухконтурной схемы замещения (рисунок 16).

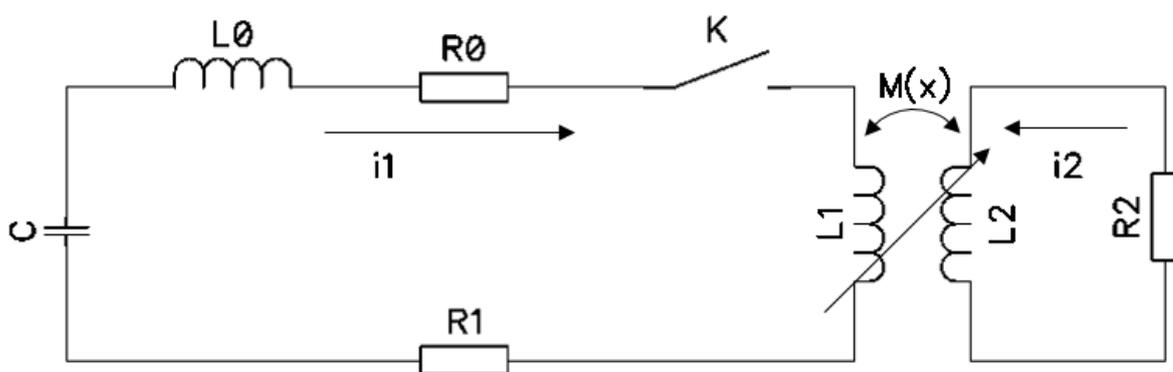


Рисунок 16 – Двухконтурная схема замещения ИС

Параметры первичного контура представляют собой индуктивность  $L_1$  и активное сопротивление  $R_1$  индуктора, паразитную индуктивность  $L_0$  и активное сопротивление  $R_0$  конденсаторной батареи, коммутатора и соединительных проводов. Параметры вторичного контура представляют собой индуктивность  $L_2$  и активное сопротивление  $R_2$  бойка, индуктивно связанного с индуктором. Сила, действующая на ИС, представляющую собой проводники с током, определяется по формуле (12)

$$F = i_1 i_2 \frac{dM}{dz}, \quad (12)$$

где  $M$  – взаимная индуктивность между индуктором и бойком.

Данное выражение, в отличие от выражения для одноконтурной схемы замещения [96], учитывает знакопеременный характер ЭМС, что имеет значение при высоких скоростях перемещения.

В общем случае взаимная индуктивность индуктора и бойка зависит от числа витков, геометрических размеров индуктора и бойка, а также расстояния между ними. Предельное значение взаимной индуктивности для плоского индуктора и бойка одинакового диаметра вычислим по формуле [104, 114] (13)

$$M_0 = \frac{\mu_0 w d_s \Psi(\alpha, \xi)}{4\pi}, \quad (13)$$

где  $d_s = (D + d) / 2$  – средний диаметр индуктора,  $D$  и  $d$  – внешний и внутренний диаметр индуктора соответственно,  $w = (D - d) / [2(\Delta_s + 2\Delta_i)]$  – число витков катушки индуктора,  $\alpha, \xi$  – величины, значение которых может быть определено по формулам [114] (14), (15)

$$\alpha = \frac{r}{d_s}, \quad (14)$$

$$\xi = \frac{z_0'}{d_s}, \quad (15)$$

где  $r = (D - d) / 2$  – ширина токовой полосы индуктора,  $z_0' = z_0 + 0,5(\Delta_1 + \Delta_2)$  – эквивалентный зазор между индуктором и бойком,  $z_0$  – начальный зазор между индуктором и бойком,  $\Delta_1, \Delta_2$  – скин-слой индуктора и бойка соответственно,  $\Psi$  – величина, определяемая таблично или по формуле, приведенной в [114].

Изменение взаимной индуктивности в зависимости от расстояния между индуктором и бойком хорошо аппроксимируется [115] экспонентой (16)

$$M = M_0 e^{-Az/d_s}, \quad (16)$$

где  $z$  – расстояние между бойком и индуктором,  $A = 2,3/\alpha^{0,326}$  – функция параметра  $\alpha = r/d_s$  для  $\alpha$  в диапазоне от 0,2 до 1,0.

Электродинамическое взаимодействие индуктора и бойка в ЛИИЭП с учетом неподвижности индуктора описывается системой дифференциальных уравнений (17) двухконтурной схемы замещения, включающей уравнения теории электрических цепей и механики

$$\begin{aligned}
(L_0 + L_1) \frac{di_1}{dt} + (R_0 + R_1)i_1 + M \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dM}{dt} &= U_c, \\
L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt} &= 0, \\
C \frac{dU_c}{dt} &= -i_1, \\
\frac{d^2 z}{dt^2} &= \frac{i_1 i_2}{m} \frac{dM}{dz} - \frac{f_z(t, z)}{m},
\end{aligned} \tag{17}$$

где  $C, U_c$  – емкость и напряжение накопителя,  $z$  – координата перемещения бойка,  $m$  – масса бойка,  $f_z(t, z)$  – сила сопротивления движению бойка.

В приведенной системе не учитывается влияние нагрева ИС на процесс преобразования энергии по причине того, что устройство для предупреждения гололеда работает при отрицательных температурах окружающей среды, а разряд конденсаторной батареи производится не чаще одного раза в минуту.

При заданных начальных условиях (18) аналитическая модель обеспечивает расчет координат перемещения бойка

$$i_1(0) = i_2(0) = 0; U_c(0) = U_0; z(0) = 0; \frac{dz}{dt}(0) = 0. \tag{18}$$

Электрические параметры схемы замещения, массогабаритные параметры ИС и провода задают граничные условия. Для расчета электрических параметров  $L_1$ ,  $R_1$ ,  $L_2$ ,  $R_2$  двухконтурной схемы замещения воспользуемся методикой, предложенной в [104], как требующей минимального числа эмпирических формул и экспериментальных данных, но обеспечивающей достаточную степень точности. Для разрабатываемого устройства считаем, что индуктор и боек имеют одинаковые радиальные геометрические размеры.

Для решения системы дифференциальных уравнений ее необходимо привести к нормальной форме Коши и проинтегрировать одним из численных методов, например, методом Рунге-Кутты четвертого порядка с автоматическим выбором шага интегрирования. Этот метод устойчив и для получения решения в следующей точке требуется значение решения только в предыдущей точке. Поэтому шаг интегрирования может быть изменен на любом этапе вычислений.

Достоинством метода является медленное накопление ошибки интегрирования при сравнительно высокой скорости вычислений. Контроль точности и выбор шага интегрирования производится путем сравнения результатов счета в одной и той же точке, полученных с шагами  $h$  и  $2h$ .

В устройстве для предупреждения гололедообразования под воздействием ЭМС происходит перемещение не только бойка, но и индуктора, т.к. в этом случае индуктор не закреплен неподвижно на земле. Для того, чтобы учесть подвижность ИС, введем дополнительные переменные:  $z_1$  – координата индуктора,  $z_2$  – координата бойка,  $z = z_1 - z_2$  – расстояние между индуктором и бойком. Индуктор и боек движутся в противоположных направлениях, их скорости и ускорения являются первыми и вторыми производными соответствующих координат перемещения по времени. При этом взаимная индуктивность зависит от расстояния между индуктором и бойком.

В устройстве для предупреждения гололеда отталкиваемая масса – это не только масса индуктора  $m_1$  или бойка  $m_2$ , но и масса штанги с функциональным блоком  $m_{шт}$  и той части провода, к которой присоединена штанга, то есть зависит от ширины контакта  $2\delta$  и погонного веса провода  $\rho$ . По мере распространения по проводу бегущей волны, происходит включение остальной части провода в движение. Таким образом масса провода, влияющая на движение бойка, возрастает со скоростью (19)

$$\mu = \frac{dm}{dt}, \quad (19)$$

где присоединяемая масса с учетом того, что процесс присоединения происходит с двух сторон от устройства, определяется как (20)

$$dm = 2\rho S dx, \quad (20)$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения провода,  $dx$  – приращение части провода, включенного в движение, в единицу времени. Откуда скорость присоединения массы провода (21)

$$\mu = \frac{2\rho S dx}{dt} = 2\rho S b. \quad (21)$$

Таким образом, движение бойка и присоединенного к нему провода рассматривается как движение тела с изменяемой массой (22)

$$m_{\Sigma 2}(t) = m_2 + m_{\text{шт}} + p2\delta + \mu t. \quad (22)$$

Масса бойка в текущий момент времени определяется аналогично. Тогда система уравнений (17) преобразуется к виду (23)

$$\begin{aligned} (L_0 + L_1) \frac{di_1}{dt} + (R_0 + R_1)i_1 + M \frac{di_2}{dt} + i_2 \frac{dM}{dt} &= U_c, \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + R_2 i_2 + M \frac{di_1}{dt} + i_1 \frac{dM}{dt} &= 0, \\ C \frac{dU_c}{dt} &= -i_1, \\ \frac{d^2 z_1}{dt^2} &= \frac{i_1 i_2}{m_{\Sigma 1}(t)} \frac{dM}{dz} - \frac{f_{z_1}(t, z_1)}{m_{\Sigma 1}(t)}, \\ \frac{d^2 z_2}{dt^2} &= -\frac{i_1 i_2}{m_{\Sigma 2}(t)} \frac{dM}{dz} + \frac{f_{z_2}(t, z_2)}{m_{\Sigma 2}(t)}. \end{aligned} \quad (23)$$

Силы, оказывающие сопротивление движению индуктора или бойка, обусловленные включающейся в движение массой провода, определим по формуле (24)

$$\vec{F}_p = \mu \vec{u}, \quad (24)$$

где  $\vec{u}$  – скорость провода относительно индуктора или бойка. Так как провод неподвижен относительно инерциальной системы отсчета, его абсолютная скорость равна нулю, поэтому относительная скорость в проекции на ось  $Oz$  определяется как (25)

$$u_z = -v_z. \quad (25)$$

Сила сопротивления движению индуктора или бойка включает в себя силу тяжести, силу упругости возвратной пружины, силу трения индуктора или бойка о корпус устройства, а также силу сопротивления провода, вызванную тяжением.

Таким образом, для силы сопротивления движению индуктора или бойка составим выражение (26)

$$\overrightarrow{f_z}(t, z) = \overrightarrow{\mu i} + \overrightarrow{m(t)g} + \overrightarrow{k(z + \Delta z)} + \overrightarrow{\eta m(t)g} + 2N \frac{z}{\sqrt{z^2 + (bt)^2}}, \quad (26)$$

где  $k$  – коэффициент упругости возвратной пружины,  $\Delta z$  – преднатяжение возвратной пружины,  $\eta$  – коэффициент трения индуктора или бойка о корпус.

При заданных начальных условиях (27) аналитическая модель (23), (26) обеспечивает расчет координат перемещения ИС, прикрепленной к паре проводов и движущейся в горизонтальном или вертикальном направлении

$$i_1(0) = i_2(0) = 0; U_c(0) = U_0; z_1(0) = z_2(0) = 0; \frac{dz_1}{dt}(0) = \frac{dz_2}{dt}(0) = 0. \quad (27)$$

Разработанная аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП устройства для предупреждения образования наледи описывает закон движения отталкиваемых тел с учетом сил сопротивления и подвижности индуктора. Расчет выполняется по заданным конструктивным параметрам ЛИИЭП устройства.

Для верификации аналитической модели, проведены расчеты по экспериментальным и численным данным, приведенным в [96]. В эксперименте рассмотрен неподвижный индуктор из медной шины и алюминиевый боек. Геометрические характеристики ИС и электрические параметры накопителя энергии приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Параметры ИС и накопителя энергии

Параметр	Значение
Удельное электрическое сопротивление бойка, Ом*м	$2,94 \cdot 10^{-8}$
Внешний диаметр индуктора и бойка, мм	78
Внутренний диаметр индуктора и бойка, мм	30
Высота шины индуктора, мм	2,8
Ширина шины индуктора, мм	0,9
Количество витков спирали индуктора, шт.	21
Паразитная индуктивность, мкГн	0,66
Паразитное активное сопротивление, Ом	0,031

Параметр	Значение
Индуктивность индуктора, мкГн	26,2
Емкость накопительного конденсатора, мкФ	200
Напряжение заряда, кВ	2
Суммарная отталкиваемая масса, кг	0,48

Для расчетов при условии неподвижности индуктора, его масса в аналитической модели задана много больше массы бойка. На рисунке 17 приведены графики изменения во времени тока в индукторе и перемещения бойка. Расхождение по току не превышает 3 %, по перемещению 5 %.

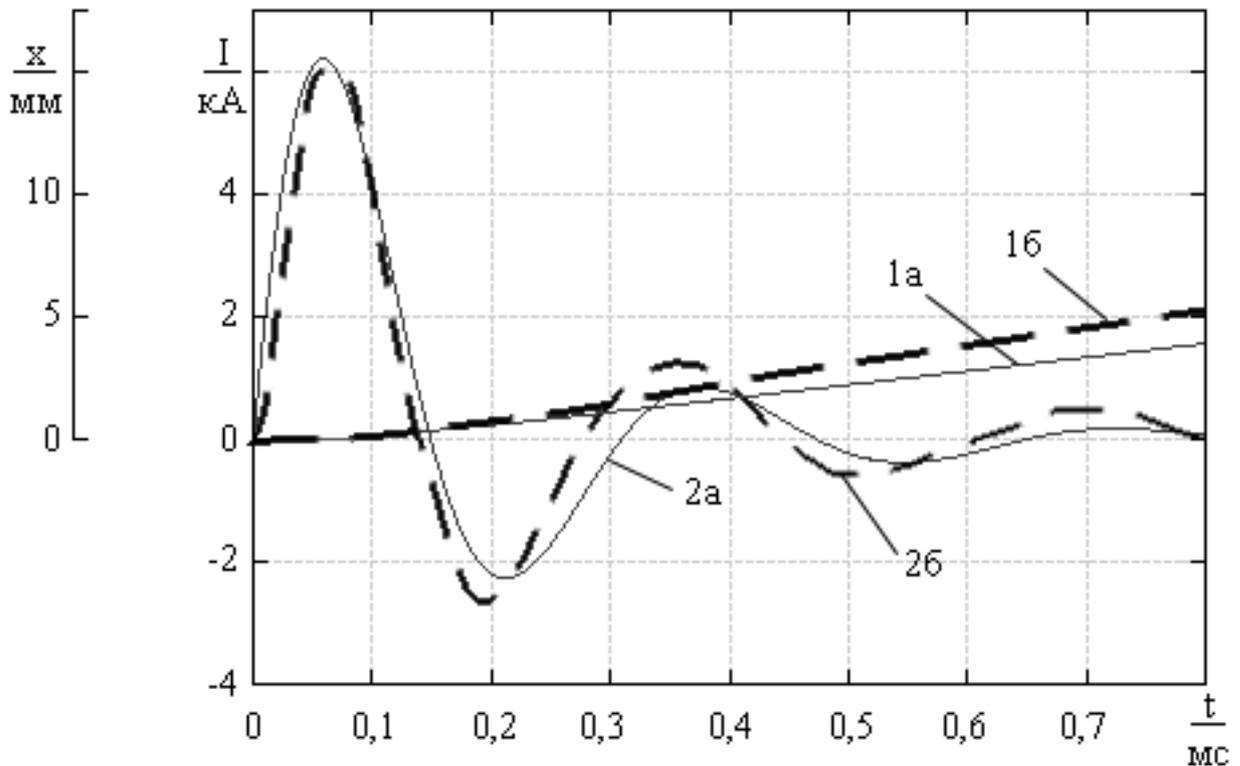


Рисунок 17 – Графики изменения во времени тока в индукторе и перемещения бойка: 1а – перемещение (расчет по приведенной модели); 1б – перемещение (расчет из источника); 2а – сила тока (расчет по приведенной модели); 2б – сила тока (эксперимент из источника)

Зачастую необходимо только оценить время удара при минимальном наборе заданных параметров. Такая задача легко решается приближенными методами, без необходимости решения аналитической модели. Известно, что время удара

соответствует половине периода импульса, что в выражении через частоту разряда определяется как (28)

$$t_{\text{уд}} = \frac{1}{2f_{\text{имп}}} . \quad (28)$$

В свою очередь частота незатухающих колебаний при разряде конденсатора на RL-цепь может быть рассчитана из выражения [116] (29)

$$f_{\text{имп}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} . \quad (29)$$

Индуктивность без учета поправок может быть рассчитана по формуле [114] (30)

$$L = \frac{\mu_0 w^2 \cdot d_s \cdot \Phi(\beta, \gamma)}{8\pi} , \quad (30)$$

где  $\beta = r/d_s$ ,  $\gamma = d/D$ ,  $\Phi$  – величина, определяемая по формуле, приведенной в [114]. Упростив представленные уравнения и задав начальные значения  $d$ ,  $D$  и  $\Delta_i$ , получаем функциональную зависимость от двух переменных – емкости и толщины провода спирали индуктора (31)

$$t_{\text{уд}} = \frac{D-d}{8(\Delta_s + 2\Delta_i)} \sqrt{(D+d)\pi\mu_0\Phi(\beta, \gamma)C} . \quad (31)$$

#### **2.4 Способы снижения токовых нагрузок в электромеханическом преобразователе**

Токи, протекающие в контурах ИС, создают ЭМС, за счет которой происходит отталкивание частей ИС. Величина ЭМС в соответствии с формулой (12) зависит от токов в обоих контурах и изменения взаимной индуктивности по перемещению. Предельное значение взаимной индуктивности зависит от геометрических параметров индуктора (13). Преобразуя выражение (12) [95], получаем зависимость силы отталкивания от двух переменных (32)

$$F = \frac{1}{2} i_1^2 \frac{dL_{\text{э}}}{dt} , \quad (32)$$

где  $\frac{dL_э}{dt}$  – производная по перемещению эквивалентной индуктивности, определяемая экспериментально. Чем дольше действует ток  $i$ , тем дольше длится механическое воздействие силы  $F(i)$  и тем больше величина импульса силы, вызывающего перемещение подвижных частей (33)

$$I_{уд} = \int_0^t F(i)dt. \quad (33)$$

Таким образом, амплитуда силы тока и время переходного процесса влияют на параметры удара. В свою очередь значения тока зависят от параметров исполнительного механизма, как электрических, так и массогабаритных. С использованием аналитической модели исследованы эти зависимости. Расчеты выполнены при следующих значениях: внешний диаметр индуктора и бойка 200 мм, внутренний диаметр индуктора и бойка 100 мм, высота и ширина шины индуктора 5 и 2 мм соответственно, ширина изоляционного слоя 2 мм, высота бойка 5 мм, материал шины индуктора – медь, материал бойка – алюминий, паразитная индуктивность 2,5 мкГн, паразитное активное сопротивление 9 мОм, ширина контакта с проводом 100 мм, устройство прикреплено к проводу АС120/19 сбоку, длина пролета 200 м, тяжение с устройством 4,44 кН.

Исследовано влияние напряжения заряда на силу тока при неизменных массогабаритных параметрах ИС и фиксированной емкости конденсатора. При этом индуктивность и сопротивление индуктора, предельное значение взаимной индуктивности остаются неизменными и равным 1,32 мкГн. Зависимость тока от напряжения заряда прямо пропорциональная (рисунок 18а). Время разряда, пропорциональное времени, в течение которого действует ЭМС, остается неизменным. ЭМС имеет аналогичную току зависимость (рисунок 18б).

Исследовано влияние емкости конденсатора при неизменных массогабаритных параметрах ИС и напряжении заряда. Уменьшение емкости конденсатора приводит к снижению времени переходного процесса и максимальной силы тока (рисунок 19а). Это происходит по причине возрастания сопротивления индуктора,

которое зависит от толщины скин-слоя. В свою очередь скин-слой зависит от частоты, определяемой емкостью. При этом индуктивность индуктора остается неизменной, а возрастание предельного значения взаимной индуктивности незначительно. ЭМС имеет аналогичную току зависимость (рисунок 19б).

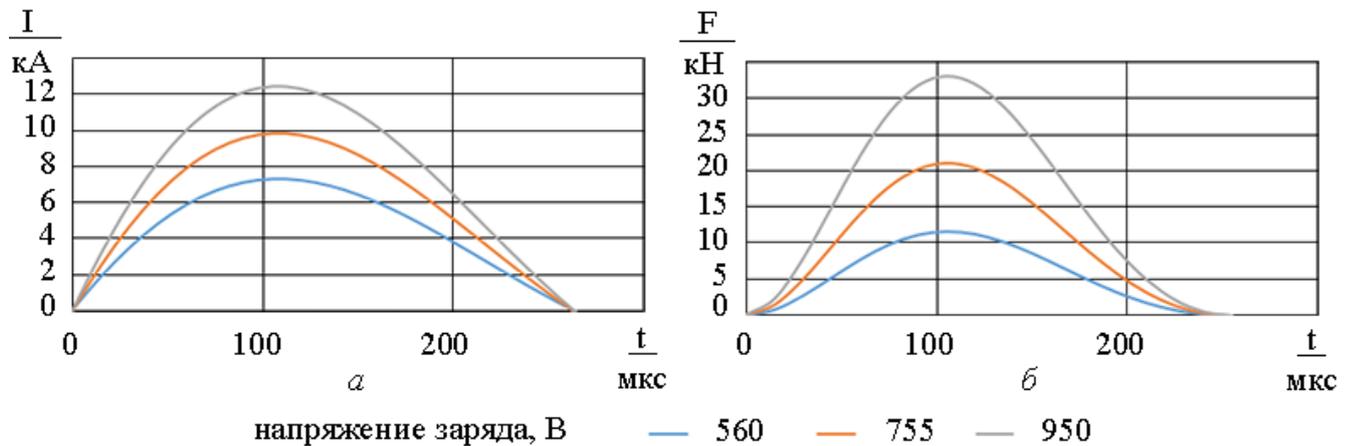


Рисунок 18 – Зависимость силы тока и ЭМС от напряжения заряда:

1500 мкФ, 12,143 мкГн, 11,8 мОм

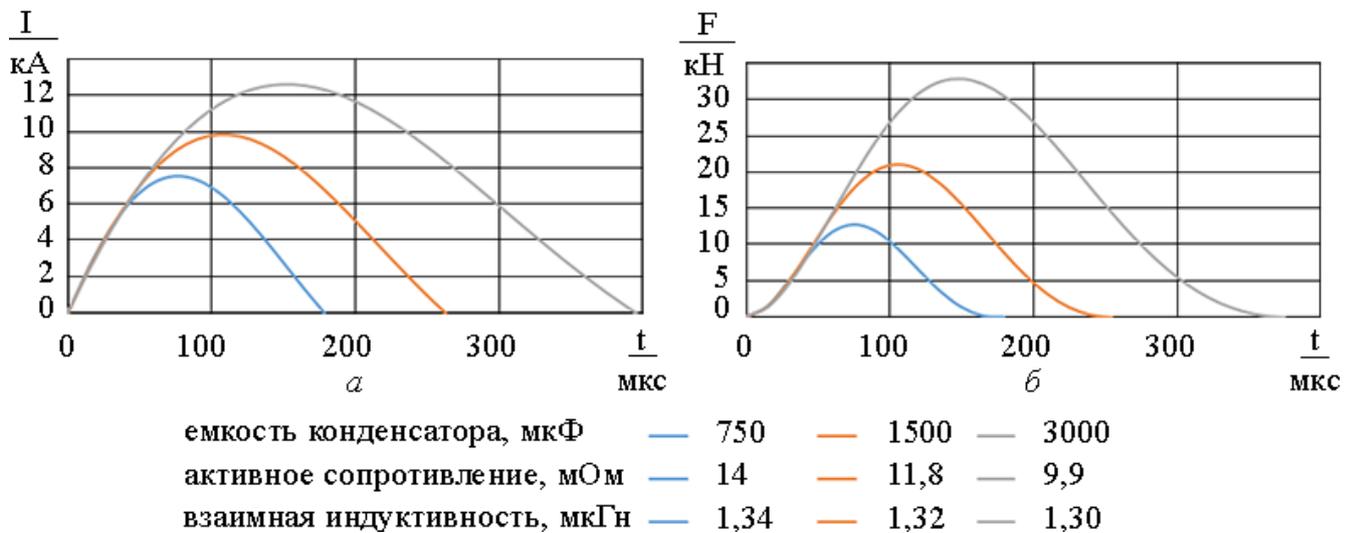


Рисунок 19 – Зависимость силы тока и ЭМС от емкости конденсатора и

активного сопротивления индуктора: 755 В, 12,143 мкГн

Изменение геометрических параметров индуктора влияет не только на его активное сопротивление, но и на индуктивность, а также на предельное значение взаимной индуктивности (13). Так, уменьшение ширины шины индуктора приводит к увеличению индуктивности и возрастанию времени переходного процесса. При этом, не смотря на увеличение активного сопротивления и снижение амплитуды силы тока в индукторе, ЭМС увеличивается (рисунок 20) по

причине увеличения количества витков индуктора (11), что приводит к значительному росту предельного значения взаимной индуктивности (13).

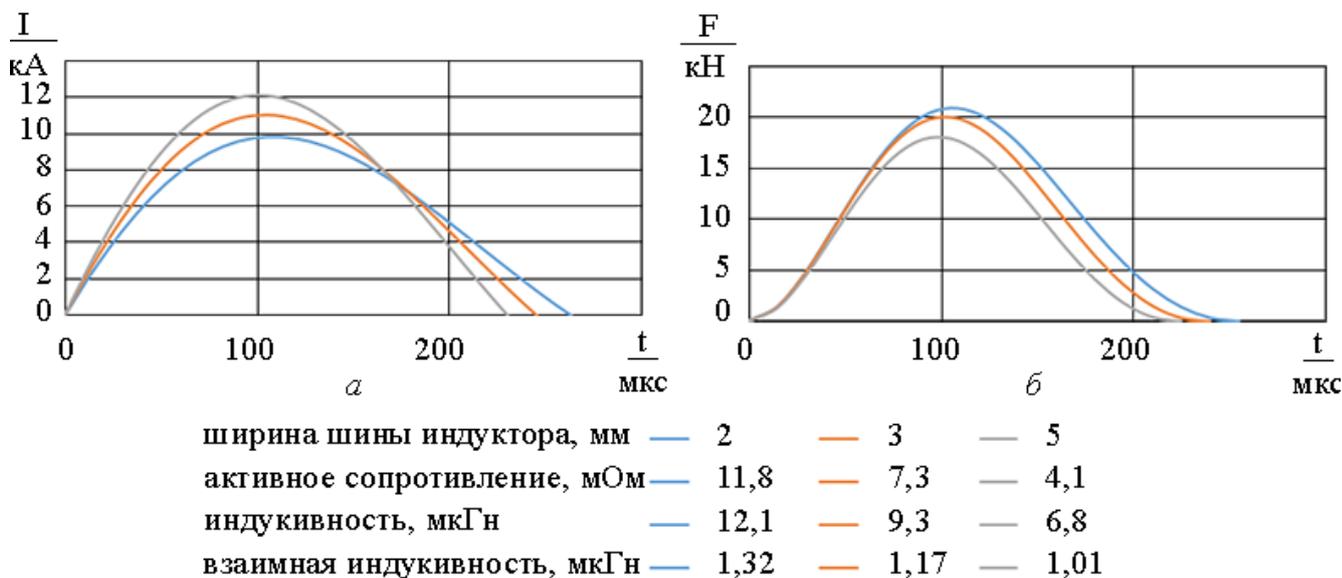


Рисунок 20 – Зависимость силы тока и ЭМС от ширины шины индуктора:

755 В, 1500 мкФ

Увеличение диаметра индуктора приводит не только к увеличению количества витков, но и к увеличению среднего диаметра индуктора, в следствие чего значительно увеличивается предельное значение взаимной индуктивности, а также индуктивность и активное сопротивление. Соответственно, увеличивается время переходного процесса и, не смотря на уменьшение амплитуда силы тока, увеличивается ЭМС (рисунок 21).

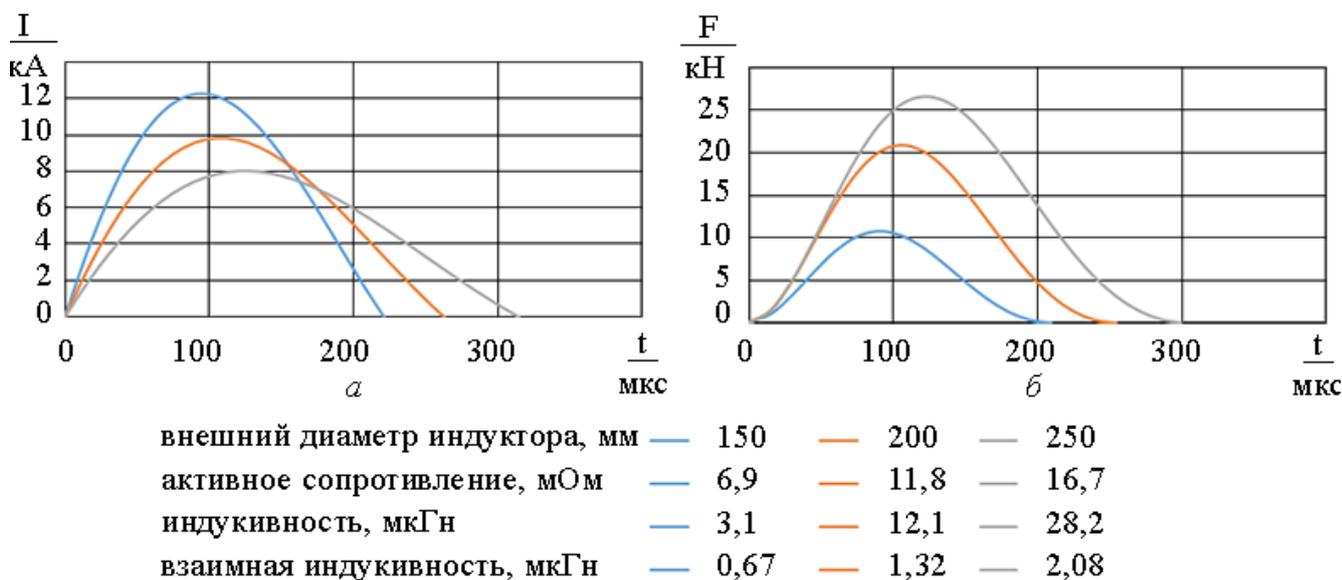


Рисунок 21 – Зависимость силы тока и ЭМС от внешнего диаметра

индуктора: 755 В, 1500 мкФ

Увеличение массы отталкиваемого тела не влияет на время переходного процесса, однако приводит к незначительному увеличению амплитуды силы тока и ЭМС (рисунок 22).

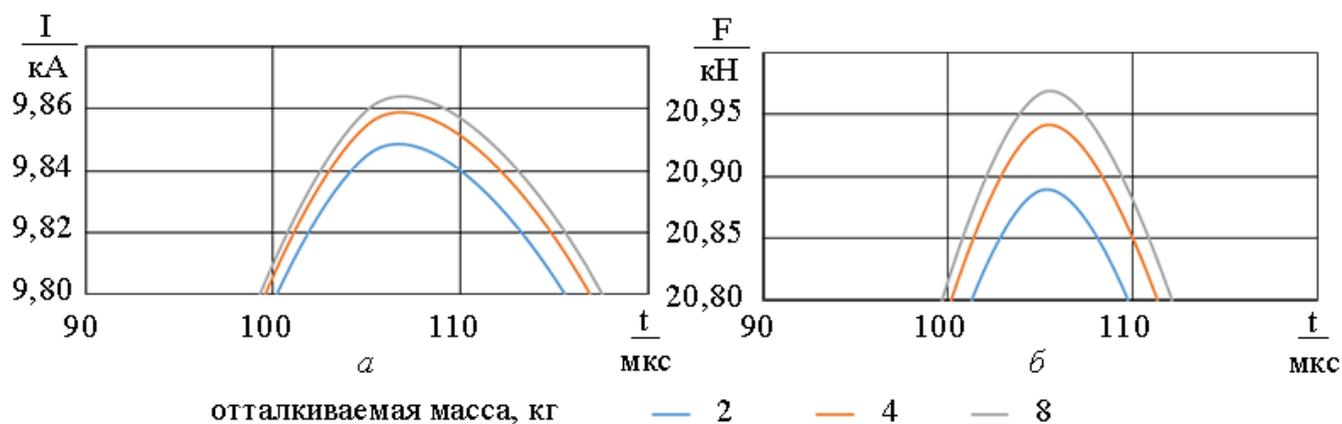


Рисунок 22 – Зависимость силы тока и ЭМС от отталкиваемой массы:

755 В, 1500 мкФ

Таким образом, ограничение максимального тока в целях минимизации токовых нагрузок и обеспечения надежности работы преобразователя, возможно путем изменения целого ряда параметров исполнительного устройства.

## 2.5 Определение места размещения устройства

Разрабатываемое устройство для предупреждения гололедообразования на проводах ЛЭП использует в качестве средства реализации своей задачи создание поперечной бегущей волны. Следовательно, оно должно крепиться исполнительной частью непосредственно на провод, чтобы передавать ему формируемое воздействие. Рассмотрим строение линии ЛЭП (рисунок 23) и возможные места крепления устройства.

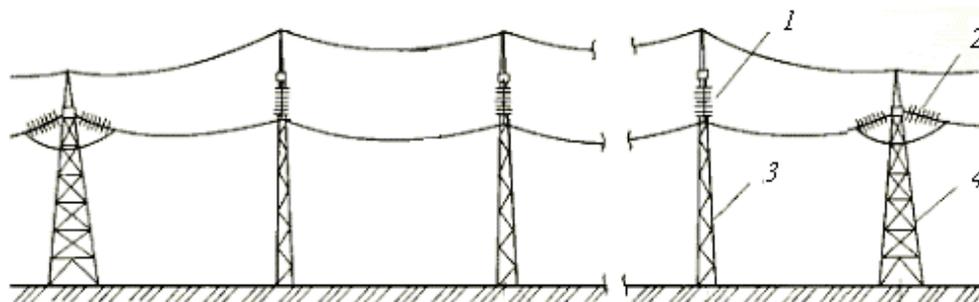


Рисунок 23 – Эскиз анкерного пролета ЛЭП: 1 – поддерживающая подвеска; 2 – натяжная подвеска; 3 – промежуточная опора; 4 – анкерная опора

Линия ЛЭП делится на участки – анкерные пролеты. На концах анкерного пролета располагаются анкерные опоры. Провод крепится к ним при помощи натяжных подвесок. Анкерный пролет делится промежуточными опорами на несколько промежуточных пролетов. В этих местах провод крепится к промежуточной опоре при помощи поддерживающих подвесок. Масса одного провода в пролете может составлять 50-500 кг.

Рассмотрим крепление к анкерной опоре при помощи натяжной подвески (рисунок 24). Длина и масса гирлянды изоляторов, а также общая длина подвески зависит от класса напряжения (таблица 4 [117]). Так, подвеска ПС-70, используемая для ЛЭП 110 кВ, имеет длину около 2,5 м, массу порядка 45 кг, из которых 80 % составляет масса изоляторов.

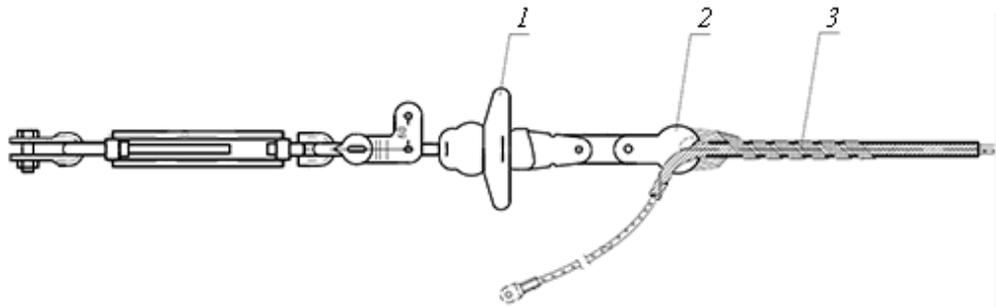


Рисунок 24 – Подвеска натяжная: 1 – изоляторы, 2 – зажим натяжной, 3 – протектор

Таблица 4 – Основные конструктивные параметры воздушных ЛЭП

Параметры	Номинальное напряжение, кВ					
	35	110	220	330	500	750
Пролёт, м	150-200	170-250	250-350	300-400	350-450	350-540
Расстояние между фазами, м	3,0	4,0	6,5	9,0	12,0	17,5
Длина гирлянды, м	0,7-1,0	1,3-1,6	2,2-2,7	3,0-3,5	4,5-4,9	6,7-7,9
Число проводов в фазе, шт.	1	1	1	2	3	4-5
Диапазон сечений проводников, мм <sup>2</sup>	50-185	70-240	240-400	240-400	300-500	240-600

Строение крепления к промежуточной опоре при помощи поддерживающей подвески несколько отличается (рисунок 25).

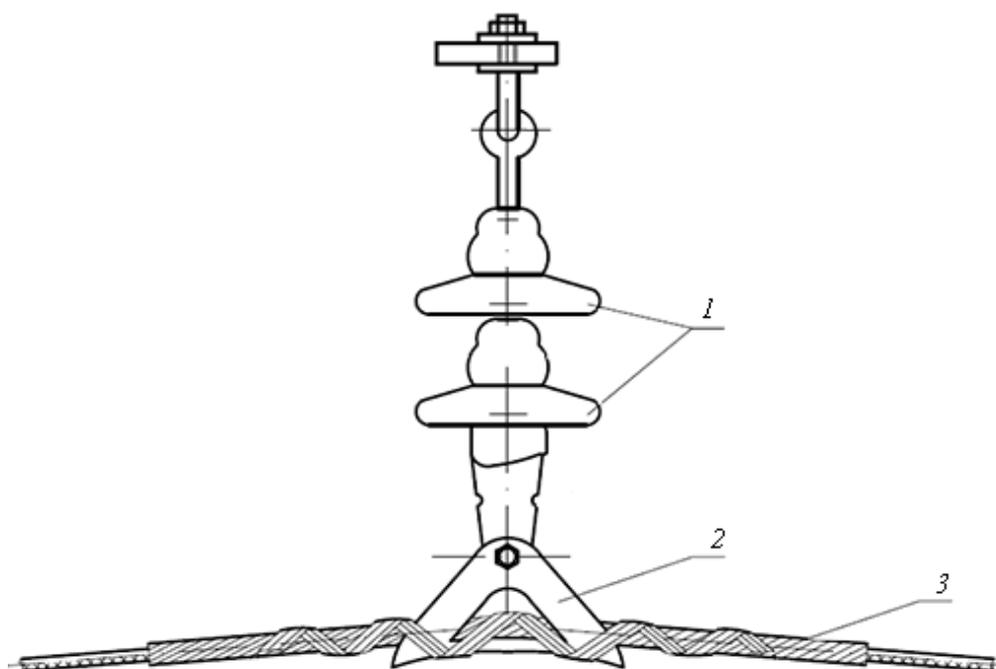


Рисунок 25 – Подвеска поддерживающая: 1 – изоляторы, 2 – зажим поддерживающий, 3 – протектор

Например, общая масса подвески ПС-70 составляет порядка 40 кг, из которых около 90 % – масса изоляторов. В обоих случаях крепления к опоре в местах подвеса на проводе располагаются спиральные усиливающие протекторы длиной около метра, за счет чего провод имеет переменную по длине жесткость [118].

В непосредственной близости к подвеске устанавливаются один-два гасителя вибрации – на расстоянии 0,5...1 м от нее. Основное назначение виброгасителя – поглощение или рассеивание энергии вибрирующих проводов и уменьшение амплитуды вибрации. Поскольку предполагается стационарное крепление устройства для предупреждения гололедообразования, то радиус его действия должен быть не меньше, чем частота установки экземпляров устройств. В связи с этим рассмотрена возможность распространения волновых возмущений через натяжную и поддерживающую подвеску в соседний пролет.

Массивность деталей конструкции пролета, сосредоточенных на его концах, способна вызывать поглощение ударно-встряхивающего воздействия от устройства. Попытка преодолеть поглощение с целью распространения колебаний в соседний пролет может вызвать усталостное разрушение провода, которое происходит в местах его закрепления либо в местах подвески устройств со

значительной массой, где условия работы провода при вибрации особенно неблагоприятны. Повреждение провода может проявляться в частичном износе его поверхности или в последовательном изломе отдельных проволок.

Опасность повреждения проводов вибрацией обусловлена не столько абсолютным значением амплитуд колебаний в пучности волны, сколько значением перегиба провода в местах его крепления, которое характеризуется углом отклонения провода (углом вибрации) в узловых точках относительно нейтрального положения [119]. Угол вибрации может быть вычислен по формуле (34)

$$\alpha = \frac{10,8A}{0,5\lambda}, \quad (34)$$

где  $A$  – амплитуда вибрации в пучности волны, мм,  $\lambda$  – длина волны вибрации, м. Наибольшие угловые отклонения провода при вибрации, определяющие степень перегиба провода в местах выхода его из зажима, находятся в пределах от 30 до 35', и только при особо интенсивной вибрации могут достигать 40-50'.

Для оценки опасности появления усталостных повреждений необходимо иметь данные о циклических напряжениях в местах подвески провода. Изгибные напряжения в проволоках наружного повива в местах подвески провода определяется по формуле [120] (35)

$$\sigma = \frac{d_A}{4} \cdot \frac{q^2 E_A}{e^{(-qx)} - 1 + qx} \cdot y_c, \quad (35)$$

где  $x$  – расстояние от последней точки контакта провода с зажимом, для данной формулы принято равным 89 мм,  $y_c$  – изгибная амплитуда,  $q$  – параметр, вычисляемый как  $q = \sqrt{N / EI_{\max}}$ , где  $EI_{\max}$  – изгибная жесткость провода, вычисляемая по формуле (36)

$$EI_{\max} = E_A \sum_i I_i + E_S \sum_j I_j, \quad (36)$$

где  $E_A, E_S$  – модули упругости для алюминиевых и стальных проволок соответственно,  $I_i, I_j$  – моменты инерции  $i$ -го повива алюминиевых и  $j$ -го повива стальных проволок.

Момент инерции  $i$ -го повива вычисляется по одинаковым формулам как для алюминиевых, так и для стальных повивов (37)

$$I_i = \frac{N_i \pi d_i^2}{8} \left( \frac{d_i^2}{8} + R_i^2 \right), \quad (37)$$

где  $N_i$  – число проволок в  $i$ -м повиве,  $R_i$  – радиус проволок  $i$ -го повива,  $d$  – диаметр проволоки наружного повива провода.

Циклические напряжения не должны превышать критического значения, которое при числе циклов колебаний большее, чем  $1,56 \cdot 10^7$ , определяется по формуле (38)

$$\sigma_{кр} = 263 \cdot N_c^{-0,17}, \quad (38)$$

где  $N_c$  – число циклов колебаний провода.

Таким образом, ударно-встряхивающее устройство для предупреждения гололеда не должно вызывать превышение допустимых значений перегиба и циклических изгибных напряжений. Поэтому для обеспечения безопасности и эффективности его работы амплитуда бегущей волны должна быть минимизирована (39)

$$A \rightarrow \min. \quad (39)$$

Более того, бегущая волна от устройства должна затухать вблизи концов пролета. Примем, что радиус распространения эффективного и безопасного воздействия находится в пределах половины длины пролета минус 1-2 % длины пролета. Таким образом, устройство должно размещаться на каждом пролете и крепиться к каждому проводу своей исполнительной частью.

Рассматривая варианты размещения устройства, будем называть области пролета слева и справа от него полупролетами. После удара волна будет распространяться по обоим полупролетам в противоположные стороны, то есть в проводе возникнут свободные колебания, при этом, пока волна не достигла концов пролета, они будут находиться в покое. При распространении колебаний вдоль полупролета будет происходить их гашение естественным образом за счет диссипативных сил, а также по достижении конца полупролета – гашение за счет

гасителей вибрации. В местах крепления провода волна частично отразится, частично перейдет в соседний пролет. Таким образом, возможные места размещения ограничиваются областью от подвески до середины пролета. Рассмотрим крайние варианты размещения.

Вариант установки устройства в непосредственной близости к подвеске предполагает, что первый полупролет равен нулю, второй – длине пролета. Поскольку изгибная жесткость провода повышается с приближением к местам крепления, то устройству будет требоваться большая сила, чтобы вызвать необходимое воздействие во втором полупролете. В то же время, доля энергии изгибной волны в первом полупролете поглотится подвеской ввиду значительности ее массы. Однако, подвеска менее упруга, чем провод (в ее состав входит чугун), а изолятор выполняется из хрупких материалов (стекло, керамика), поэтому вибрации, сообщаемые от устройства, расположенного вблизи от подвески, могут оказывать на нее разрушающее воздействие. При этом задача предупреждения гололедеобразования будет возлагаться на возмущение, распространяющееся во втором полупролете. Размещение же устройства в центре пролета, в отличие от смещенного, обеспечит равноценное распространение воздействия в обе стороны. Таким образом, в качестве места размещения исполнительного устройства предпочтительнее рассматривать центр пролета. С целью подтверждения выдвинутых предположений о месте размещения устройства следует провести численные исследования.

## **2.6 Анализ влияния способа крепления устройства на его конструктивное исполнение**

Проанализируем влияние способа крепления устройства на его конструктивное исполнение [121]. Устройство может крепиться к проводу снизу, и соответственно сообщать ударные воздействия в вертикальной плоскости. Или же устройство может крепиться к проводу сбоку, устанавливаясь враспор между фазными проводами с помощью упругих штанг из диэлектрического материала.

Общим для обоих типов крепления является то, что внутри устройства должны располагаться все функциональные части, включая накопители заряда, управляющие платы и т.д. Питание устройства должно осуществляться бесконтактным способом от провода, по типу токовых клещей. Таким образом, минимальная масса устройства обусловлена функциональными требованиями к нему и комплектующими, обеспечивающими эти требования. Соединение с проводом при любом способе крепления должно быть жестким, что обеспечит полную передачу механического воздействия, которое генерирует исполнительный механизм, а также снизит опасность повреждения провода.

При креплении устройства снизу, конструкция может иметь исполнение, обеспечивающее «удар вниз» (рисунок 26) либо «удар вверх» (рисунок 27).

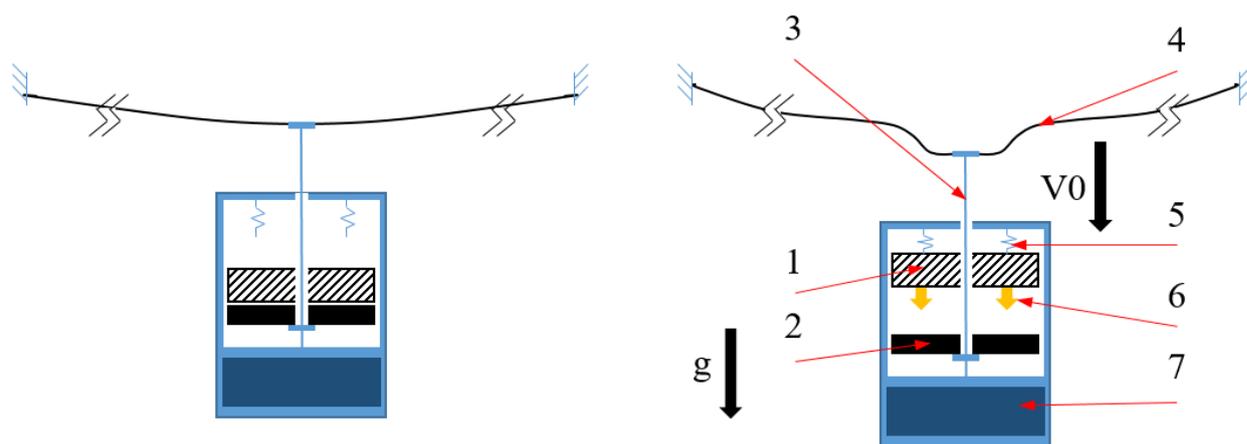


Рисунок 26 – Крепление устройства снизу, «удар вниз» (вид сбоку): 1 – индуктор; 2 – боек; 3 – штанга; 4 – провод ЛЭП; 5 – пружины (амортизационная система); 6 – сила Ампера; 7 – функциональный блок

Вариант исполнения «удар вниз» менее эффективен, чем исполнение «удар вверх», для удаления присоединенной массы капель воды, собирающихся преимущественно в нижней части провода. Это связано с тем, что при ударе вниз капли под действием силы инерции, растекаются по нижней поверхности провода. Поэтому в дальнейшем исполнение «удар вниз» рассматривать не будем.

Как было сказано выше, боек должен быть плотно прижат к индуктору до удара, поэтому конструкция устройства при исполнении «удар вверх» требует

наличия прижимающего механизма. В качестве такого механизма может выступать пружина, которая при ударе окажет сопротивление движению.

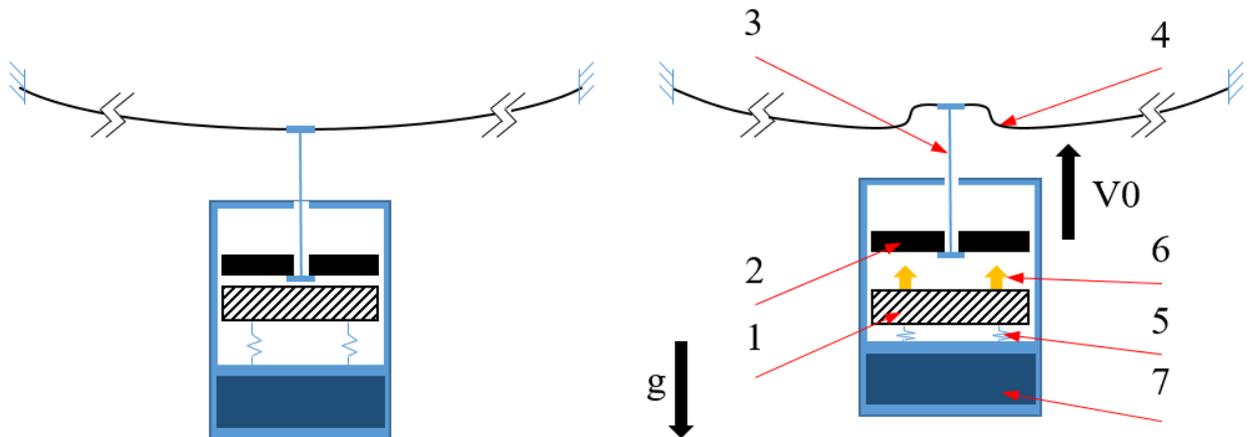


Рисунок 27 – Крепления устройства снизу, «удар вверх» (вид сбоку): 1 – индуктор; 2 – боек; 3 – штанга; 4 – провод ЛЭП; 5 – пружины (амортизационная система); 6 – сила Ампера; 7 – функциональный блок

Если обратиться к разработкам магнитно-импульсных метателей инденторов [96, 103, 122], то все они исходят из неподвижности индуктора. Другими словами, считается, что масса индуктора много больше массы метаемого тела, поэтому индуктор остается неподвижным в инерциальной системе отсчета, связанной с наблюдателем. В случае устройства для предупреждения гололедообразования на ЛЭП, и индуктор, и боек подвижны, поэтому, скорость бойка прямо пропорциональна относительной массе индуктора (40)

$$v_2 = \frac{m_1}{m_{\Sigma 2}} v_1. \quad (40)$$

Для исследования влияния параметров устройства на амплитуду и ускорение его перемещения, построим динамические модели при боковом и нижнем способах крепления. Движение части ИС, жестко соединенной с проводом будем рассматривать как движение тела с изменяемой массой. Это представление обосновано тем, что под действием удара в движение включается не весь провод, а только малая его часть в окрестности ударяющего тела. По мере распространения бегущей волны, происходит включение остальной части провода в движение. Также будем рассматривать массы индуктора и бойка как мгновенно отделяемые, то есть без учета электромагнитного взаимодействия ИС после удара.

Такое упрощение допустимо, так как сила Ампера действует короткое время (порядка сотен микросекунд) и по мере удаления бойка от индуктора резко спадает.

Для варианта крепления устройства снизу, дополним условие согласования (7) выражениями силы сопротивления массы провода, включающегося в движение (24) и действия возвратной пружины. Составленная система нелинейных дифференциальных уравнений второго порядка описывает движение устройства при разряде накопителя энергии на ИС (41)

$$\begin{cases} m_{\Sigma 2} \frac{d^2 z_2}{dt^2} = -\mu \frac{dz_2}{dt} - k(z_2 - z_1) - 2N_z(t) \sin \frac{z_2}{\sqrt{z_2^2 + (bt)^2}}, \\ m_1 \frac{d^2 z_1}{dt^2} = k(z_2 - z_1). \end{cases} \quad (41)$$

С целью снижения трудоемкости проводимых исследований при сохранении достаточной точности качественной оценки процессов, принято решение о линеаризации системы уравнений за счет пренебрежения сопротивлением провода движению и допущения о постоянстве массы, так что после линеаризации система уравнений представляет собой выражение (42)

$$\begin{cases} m_{\Sigma 2(0)} \frac{d^2 z_2}{dt^2} = -k(z_2 - z_1), \\ m_1 \frac{d^2 z_1}{dt^2} = k(z_2 - z_1). \end{cases} \quad (42)$$

Решая полученную линейную систему дифференциальных уравнений второго порядка, получим динамическую модель движения устройства при нижнем типе крепления (43)

$$z_2(t) = \left( \frac{m_{\Sigma 2(0)}(v_2 - v_1)}{m_{\Sigma 2(0)} + m_1} + v_1 \right) t + \frac{m_1(v_2 - v_1)}{m_{\Sigma 2(0)} + m_1} \sqrt{\frac{km_{\Sigma 2(0)}m_1}{m_{\Sigma 2(0)} + m_1}} \sin \sqrt{\frac{k(m_{\Sigma 2(0)} + m_1)}{m_{\Sigma 2(0)}m_1}} t. \quad (43)$$

Начальные условия для динамической модели (44)

$$z_1(0) = z_2(0) = 0; \frac{dz_1(0)}{dt} = v_1(0); \frac{dz_2(0)}{dt} = v_2(0). \quad (44)$$

При креплении устройства сбоку, концы штанги упираются в пару проводов (рисунок 28).

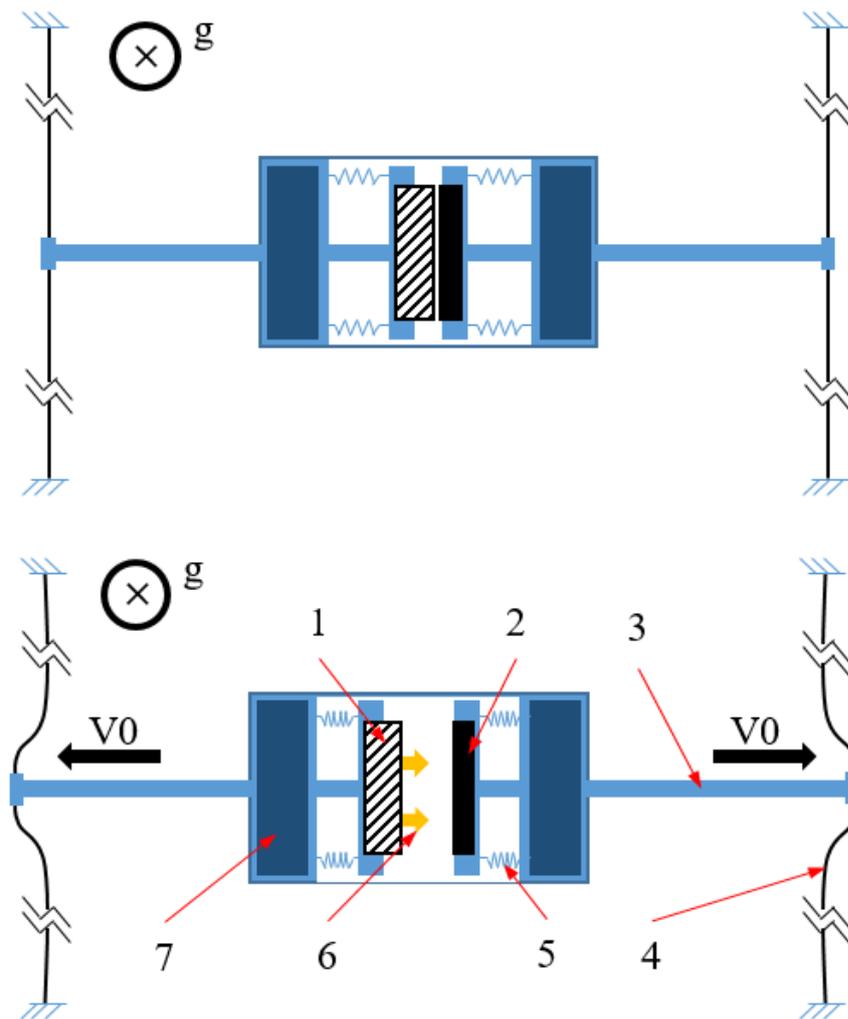


Рисунок 28 – Крепление устройства сбоку (вид сверху): 1 – индуктор; 2 – боек; 3 – штанга; 4 – провод ЛЭП; 5 – пружины (амортизационная система); 6 – сила Ампера; 7 – функциональный блок

В связи с этим одной из важнейших задач является обеспечение необходимой электрической прочности. Так, крепление между фазными проводами двухцепной линии, где напряжение не превышает 100 В и изготовление штанги и крепежного механизма из легких, но прочных изоляционных материалов (полимеров) обеспечит требуемую прочность. Преимуществом бокового типа крепления устройства является равенство масс, отталкиваемых ИС, поскольку на противоположных концах штанги закреплены одинаковые провода. За один удар происходит предупреждение гололедообразования сразу на паре проводов, что энергетически более эффективно по сравнению с креплением устройства снизу. Кроме этого, требуется в два раза меньше устройств из расчета на количество

проводов, чем при размещении снизу. Боковой тип крепления устройства может обеспечить дополнительную защиту от вибрации за счет вмонтированной в штангу устройства амортизационной системы – пневмоцилиндра с блокировкой.

В отличие от нижнего способа крепления, в этом случае сила тяжести направлена перпендикулярно движению бойка. Также, в отличие от нижнего способа крепления, после удара индуктор и боек движутся независимо друг от друга, в связи с чем можно рассматривать только движение бойка считая, что выражения для движения индуктора полностью повторяют выражения для бойка и при равенстве масс со стороны индуктора и бойка движутся одинаково, но в противоположных направлениях.

Движению ИС оказывают сопротивление провод, включающийся в движение, возвратные пружины и трение о корпус. Составлено нелинейное дифференциальное уравнение второго порядка движения устройства со стороны индуктора / бойка при разряде накопителя энергии на ИС (45)

$$m_{\Sigma 2} \frac{d^2 z}{dt^2} = -\mu \frac{dz}{dt} - k(z + \Delta z) - \eta m_{\Sigma 2} g - 2N_x(t) \sin \frac{z}{\sqrt{z^2 + (bt)^2}}. \quad (45)$$

С целью снижения трудоемкости проводимых исследований при сохранении достаточной точности качественной оценки процессов, принято решение о линеаризации системы уравнений за счет пренебрежения сопротивлением провода движению и допущения о постоянстве массы, так что после линеаризации уравнение представляет собой выражение (46)

$$m_{\Sigma 2(0)} \frac{d^2 z}{dt^2} = -k(z + \Delta z) - \eta m_{\Sigma 2(0)} g. \quad (46)$$

Решая полученное линейное дифференциальное уравнение второго порядка, получим динамическую модель движения устройства со стороны индуктора / бойка при боковом типе крепления (47)

$$z(t) = \left( \Delta z + \frac{\eta m_{\Sigma 2(0)} g}{k} \right) \cos \sqrt{\frac{k}{m_{\Sigma 2(0)}}} t + \sqrt{\frac{m_{\Sigma 2(0)}}{k}} v_{2(0)} \sin \sqrt{\frac{k}{m_{\Sigma 2(0)}}} t - \Delta z - \frac{\eta m_{\Sigma 2(0)} g}{k}. \quad (47)$$

Начальные условия для динамической модели (48)

$$z_{2(0)} = 0; \frac{dz_{2(0)}}{dt} = v_{2(0)}. \quad (48)$$

С помощью полученных динамических моделей проведена качественная оценка влияния параметров устройства на движение частей ИС в месте крепления к проводу. Рассмотрено влияние массы устройства при значениях 4; 8 и 16 кг. При этом отталкиваемые массы со стороны бойка и индуктора равны. Начальная скорость бойка задана 1,7 м/с, коэффициент упругости возвратной пружины 14,709 Н/мм, преднатяжение возвратной пружины при боковом способе крепления 2,2 мм, коэффициент трения 0,5. Результаты расчетов по динамической модели приведены в сравнении с численными расчетами с использованием модели, рассмотренной в третьей главе, на проводе ЛЭП АС120/19 при длине пролета 200 м и тяжении 3,93 кН без устройства.

Изменение массы устройства значительно влияет и на время движения бойка, и на амплитуду (рисунок 29). При прочих равных полупериоды колебаний при боковом ударе больше, чем при нижнем; соответственно, ускорения, с которыми движется боек – меньше. Для обоих типов крепления уменьшение массы устройства при фиксированной скорости обеспечивает большие ускорения.

Рассмотрено влияние начальной скорости бойка при значениях 1,7; 3,4 и 6,8 м/с. При этом масса устройства равна 8 кг, отталкиваемые массы со стороны бойка и индуктора равны. Другие переменные заданы те же. Результаты расчетов по динамической модели приведены в сравнении с численными расчетами с использованием той же модели. Изменение скорости, сообщаемой бойку при ударе, почти не влияет на время движения бойка, однако, более значительно влияет на амплитуду (рисунок 30).

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.

Полученные динамические модели дают представление о движении частей ИС в месте крепления к проводу. Таким образом, если требуется увеличить ускорение удара, то следует уменьшать массу устройства и увеличивать начальную скорость. Нижний тип крепления, обеспечивающий удар провода вверх, при

прочих равных обеспечивает большие ускорения по сравнению с боковым типом крепления. Однако, при этом сокращается полупериод колебаний, ввиду чего сокращается длина бегущей волны, созданной при ударе, а значит возрастает опасность превышения допустимых изгибных нагрузок на провод.

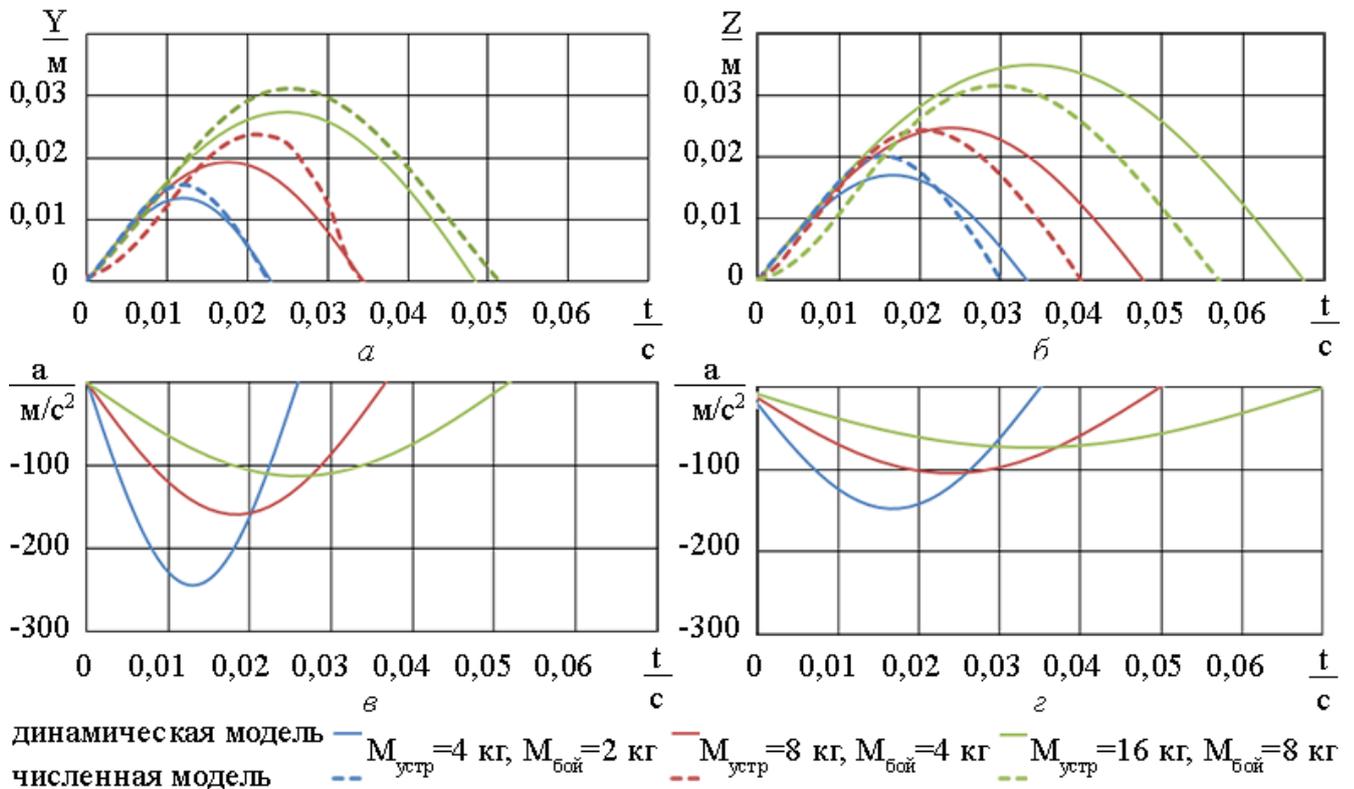


Рисунок 29 – Влияние массы ( $v_2(0)=1,7$  м/с): а – перемещение, крепление снизу; б – перемещение, крепление сбоку; в – ускорение, крепление снизу; г – ускорение, крепление сбоку

Ввиду задачи, заключающейся в качественной оценке влияния параметров устройства, в модели не учитываются сопротивление провода движению и изменяемость массы, за счет чего снижена трудоемкость при сохранении достаточной точности качественной оценки происходящих процессов. Для получения точных результатов о движении бойка в месте крепления к проводу, исследования распространения возмущения вдоль провода и реакции присоединенной капли воды на удар, необходимо построить численную модель.

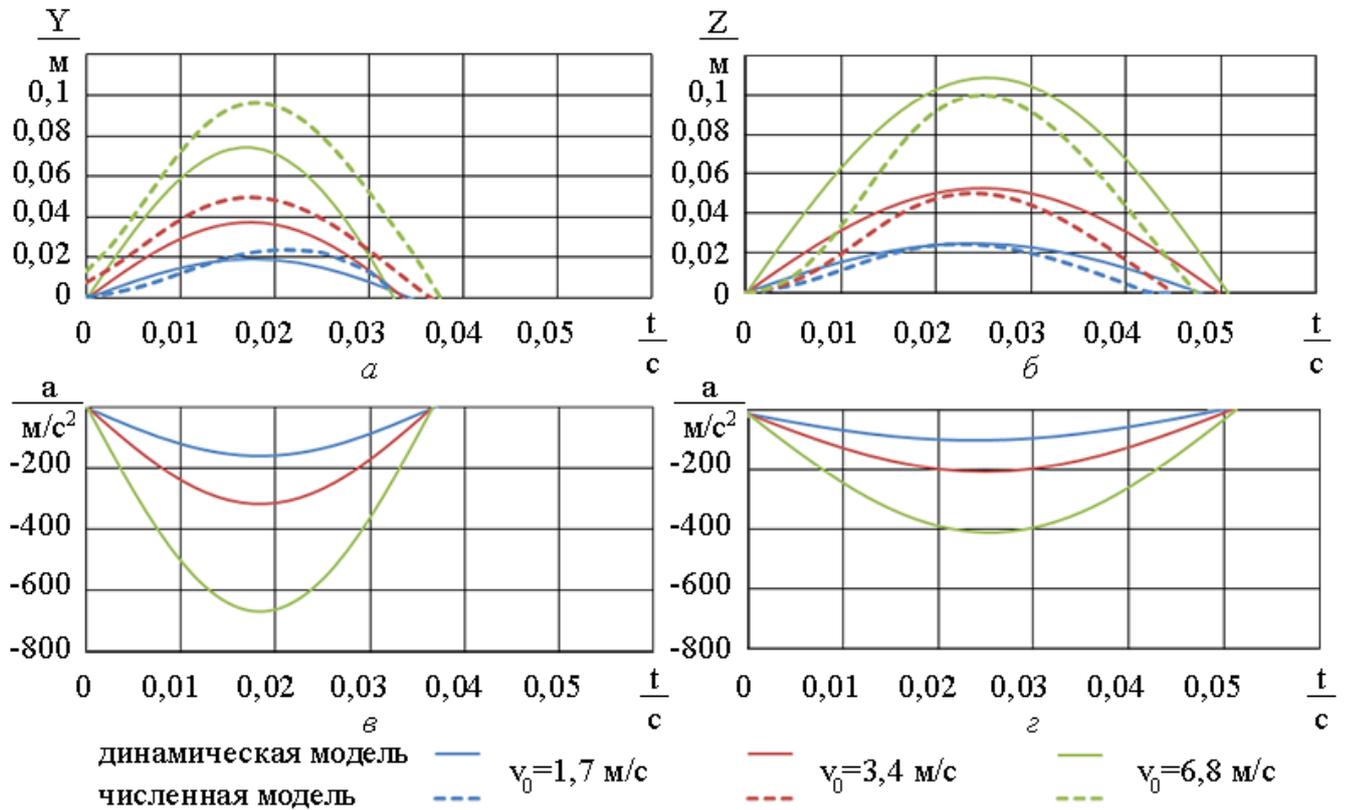


Рисунок 30 – Влияние скорости ( $m_{\Sigma 2(0)}=4$  кг): а – перемещение, крепление снизу; б – перемещение, крепление сбоку; в – ускорение, крепление снизу; г – ускорение, крепление сбоку

## Выводы по главе 2

1. Обоснован выбор исполнительного механизма устройства для предупреждения гололедообразования из класса электромеханических преобразователей в пользу ЛИИЭП. Главным преимуществом ЛИИЭП является способность обеспечивать соответствие параметров удара расчетным значениям в диапазоне сотен микросекунд и тысяч ньютонов.

2. Изучены системные свойства ЛИИЭП. Разработана аналитическая модель электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП с учетом подвижности ИС и сил сопротивления движению ИС. Расчет параметров для аналитической модели зависит от формы ИС. Рассмотрен частный случай – плоская ИС.

3. Исследованы способы снижения токовых нагрузок в цепи индуктора, влияние электрических параметров исполнительного механизма на время переходного процесса и ЭМС.

4. Проведен анализ места размещения устройства с учетом строения пролета, исходя из чего центр пролета определен в качестве предпочтительного места размещения исполнительного устройства. Выбор в пользу центра пролета обоснован безопасностью и эффективностью работы устройства.

5. Проведен анализ влияния способа крепления устройства на его конструктивное исполнение. Рассмотрены варианты бокового и нижнего крепления.

6. Разработана динамическая модель устройства для качественной оценки влияния его параметров на движение частей ИС в месте крепления к проводу при боковом и нижнем способах крепления устройства. Проведена качественная оценка влияния массы и начальной скорости устройства на его перемещение.

## ГЛАВА 3 ЧИСЛЕННЫЕ И МОДЕЛЬНЫЕ ЭКСПЕРИМЕНТЫ

Получение уравнений поперечно-продольных колебаний при точечном ударе по такой распределенной системе, как провод, является достаточно сложной задачей. Это связано со сложностью учета в аналитической модели изгибной жесткости провода и значительности стрелы провеса. Для определения динамики провода под воздействием присоединенного тела требуется учет и других факторов: массы устройства, ширины зацепления с проводом, закона изменения скорости движения присоединенного тела. Однако, известно, что для аналитических методов, позволяющих получить точные решения, сложность анализа иногда многократно возрастает при вариациях исходных данных [123]. Численными методами задача получения динамики провода допускает относительно несложное решение.

Ниже исследуется реакция провода и присоединенной массы на удар с применением дискретной модели, состоящей из цепочки масс конечной длины, соединенных невесомыми упругими элементами. Выявляются общие свойства и закономерности влияния силы и времени удара на амплитуду отклонения провода и ускорение, с которым движется присоединенная масса на конце пролета [124-127]. Как частный случай изучается динамика уменьшенной модели пролета ЛЭП.

### 3.1 Определение параметров численной модели

#### 3.1.1 Параметры численной модели провода

Существующие подходы к решению задачи динамики провода численными методами подразумевают представление расчетной модели провода в виде цепочки дискретных элементов (сосредоточенных масс либо стержней), связанных невесомыми упругими элементами. Известны решения [128-130], когда такая модель качественно правильно отражает динамику физических процессов, происходящих в упругом стержне при ударных воздействиях.

Модель провода представляет собой стержень равномерного поперечного сечения. Элемент модели провода способен противостоять осевым силам,

изгибающим моментам вокруг двух главных осей в плоскости его поперечного сечения и крутящим моментам вокруг центральной оси. Для компьютерного моделирования динамики провода решено использовать формулировку МКЭ в терминах абсолютных узловых координат ANCF (absolute nodal coordinates formulation) [131, 132]. Благодаря использованию в качестве узловых координат положения узлов в глобальной системе координат и их производных вместо деформаций и небольших поворотов, сохраняется матрица постоянной массы и отсутствует квадратичный вектор скорости, в то же время учитываются вращательная инерция, сдвиг и кручение, что обеспечивает решение задач при больших ускорениях.

Для возможности моделирования не только динамики провода, но и присоединённого устройства, а также капель на проводе, наиболее предпочтителен метод многотельного моделирования (multibody simulation, MBS). Назначение метода MBS заключается в изучении динамического поведения системы, состоящей из множества взаимосвязанных жестких или упругих тел, испытывающих большие перемещения и / или вращения. За счет малой размерности системы уравнений динамики упругого тела обеспечивается быстрый расчет его движения без существенной потери точности. Все эти преимущества определили выбор инструмента для численных исследований, включающего в себя реализацию метода MBS и подхода ANCF. Таким программным продуктом для кинематического анализа оказался Adams (Automatic Dynamic Analysis of Mechanical Systems) [133] компании MSC.Software (США).

На этапе создания модели провода необходимо определить ее параметры:

– шаг дискретизации (количество элементов на метр). От данного параметра зависит точность полученного решения: чем больше элементов, тем точнее может быть описана форма колебаний. Минимум пять элементов должно описывать минимальную длину волны от удара, откуда шаг дискретизации вычисляется по формуле (49)

$$n = \frac{5}{\lambda}. \quad (49)$$

– коэффициенты жесткости. Поскольку обычно провод изгибается намного легче, чем растягивается, и несколько легче скручивается, чем растягивается, то рекомендуемые значения для коэффициентов осевой жесткости  $R_{kx}$ , изгибной  $R_{kb}$  и крутильной  $R_{kt}$  лежат в области  $R_{kx} > 1$ ,  $R_{kb} \ll 1$  и  $R_{kt} < 1$ . Коэффициенты жесткости должны обеспечивать требуемую стрелу провеса при заданном тяжении. Коэффициент тяговой системы позволяет регулировать длину провода, стрелу провеса и натяжение в пролете.

– коэффициент демпфирования  $D_p$  задает корректное значение собственной частоты колебаний. Следует вычислить собственную частоту колебаний  $n$ -ой гармоники, затем сопоставить это значение с собственной частотой провода в системе компьютерного моделирования Adams. Это можно выполнить путем возбуждения свободных колебаний провода при помощи поперечного удара маятником, воспользовавшись затем расчетом быстрого преобразования Фурье.

– шаг интегрирования. Верхний порог интегрирования зависит от периода колебания системы и должен отличаться для времени генерации удара и для времени распространения колебания по проводу. Минимум в три момента времени должен производиться расчет для полупериода колебания, откуда шаг интегрирования может быть вычислено по формуле (50)

$$t = \frac{T}{4}. \quad (50)$$

### 3.1.2 Параметры численной модели капли

На этапе создания модели капли необходимо определить ее параметры. Будем рассматривать удаление висящей капли на основании того, что капли воды под действием силы тяжести скатываются с верхних и боковых сторон провода и собираются внизу. Строго говоря, форма висящей капли отличается от формы сектора шара, однако это отличие невелико и для наших расчетов мы им пренебрежем.

Таким образом, заменим каплю ее математической моделью в сферическом приближении [134] – сектором шара высотой  $h$  и радиусом основания  $r$ . При этом высота капли может быть меньше или равна радиусу шара, с которым они связаны известной зависимостью (51)

$$R = \frac{r^2 + h^2}{2h}. \quad (51)$$

Зная высоту и радиус капли, а также плотность воды  $\rho$ , вычислим массу капли (52)

$$m = \rho V = \rho \pi h^2 \left( R - \frac{1}{3} h \right) = \rho \frac{\pi h}{6} (3r^2 + h^2). \quad (52)$$

Известно, что капля удерживается на поверхности за счет силы поверхностного натяжения. Данную силу можно выразить следующей формулой (53)

$$F_{\text{ПОВ}} = 2\pi r \sigma, \quad (53)$$

где  $\sigma$  – коэффициент поверхностного натяжения.

Капля не отрывается, пока сила поверхностного натяжения, которая действует на нее вдоль длины окружности, может противодействовать силе тяжести, которая действует на каплю в вертикальной проекции. Другими словами, пока масса капли  $m_{\text{кап}}$  при неизменном радиусе основания не превышает некоторого критического значения (54)

$$m_{\text{max}} = \frac{2\pi r \sigma}{g}. \quad (54)$$

Таким образом, предельная сила тяжести может быть определена по формуле (55)

$$F_{\text{ТЯЖ}} = m_{\text{max}} g. \quad (55)$$

Удалить каплю радиусом  $r$  с поверхности провода можно при помощи удара, если равнодействующая сила инерции, которая при этом возникает, превышает силу поверхностного натяжения. Если удар производится сбоку (рисунок 31), то равнодействующая сила инерции является векторной суммой вектора силы инерции и вектора силы тяжести (56)

$$F_{ин(р)} = \sqrt{(m_{кап}a)^2 + (m_{кап}g)^2} . \quad (56)$$

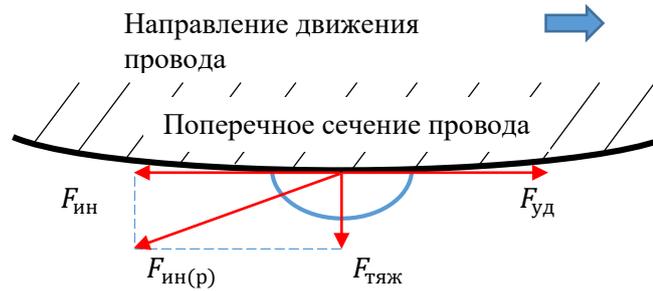


Рисунок 31 – Кинематическая модель капли воды при боковом ударе

Если удар производится снизу (рисунок 32) и провод под действием удара движется вверх (реализация схемного решения «удар вверх»), то равнодействующая сила инерции равна сумме силы инерции, действующей в вертикальном направлении вниз и вектора силы тяжести (57)

$$F_{ин(р)} = m_{кап}a + m_{кап}g . \quad (57)$$

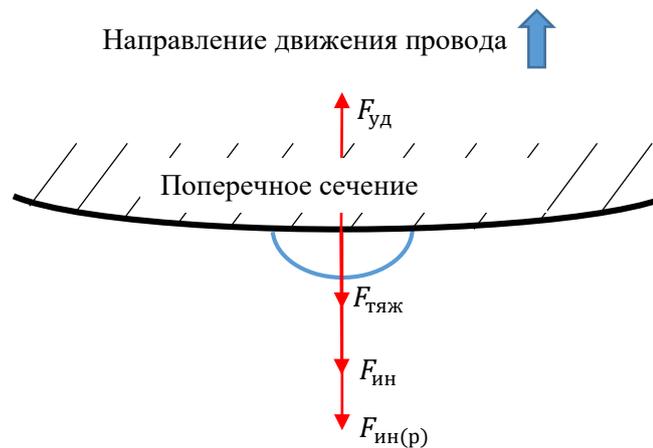


Рисунок 32 – Кинематическая модель капли воды при нижнем ударе

Уравнения (56), (57) выражают условия отрыва висящей капли от поверхности в зависимости от направления движения этой поверхности под действием ускорения. Откуда минимально необходимое ускорение для отрыва капли при ударе сбоку (58) и снизу (59)

$$a_{min} \geq \frac{\sqrt{(2\pi r\sigma)^2 - (m_{кап}g)^2}}{m_{кап}} , \quad (58)$$

$$a_{min} \geq \frac{2\pi r\sigma}{m_{кап}} - g . \quad (59)$$

При движении провода вверх требуется меньшее ускорение, чем при движении вбок. Однако, на отрыв капли от поверхности влияет не только ускорение, но и амплитуда колебаний. Известно [135], что при ультразвуковом диспергировании амплитуда должна быть не меньше, чем 10 % от радиуса капли; при статическом срыве капли – не менее 150 % [136]. Таким образом, принято, что для исследуемой задачи амплитуда колебаний провода должна быть больше половины радиуса капли (60)

$$A_{\min} \geq \frac{1}{2} r. \quad (60)$$

### 3.2 Моделирование в системе кинематического анализа

Для построения в Adams модели провода ЛЭП в виде цепочки масс использован модуль Machinery Cables. Этот модуль включает в себя параметризованную виртуальную модель узлов кабеля и инструменты его создания, за счет чего возможно автоматическое изменение свойств модели или ее конфигурации. Элементы провода являются твердыми телами, обладающими распределенной по объему массой и инерцией. Они связаны упругими соединениями, благодаря чему реализуется продольная жесткость, жесткость на изгиб и скручивание (рисунок 33).



Рисунок 33 – Дискретная модель провода: 1 – элемент провода; 2 – упругое соединение

Массы на концах открытой (незамкнутой) модели провода закреплены на элементах, называемых в модели якорями (anchors). Якоря закрепляются на «земле» при помощи маркеров, в модели эти объекты выполняют роль опор. Таким образом реализуется шарнирное крепление концов провода, сходное с реальным.

Модель провода в Adams включает в себя объекты pulleys (шкивы), которые до начала расчета должны находиться в контакте с проводом. Тем не менее, в процессе симуляции шкивы отсоединяются от кабеля. Задать необходимую силу натяжения позволяет объект winch (коэффициент тяговой системы), который позволяет добавлять / убирать длину провода в полете. Провод характеризуется геометрическими и физическими параметрами: диаметр элементов, количество элементов на метр, плотность материала провода, модуль Юнга, коэффициенты жесткости, демпфирования.

Для определения сил и моментов используется модель стержня Эйлера-Бернулли в нелинейной постановке. Элемент балки представляет собой прямой стержень равномерного поперечного сечения, способный противостоять осевым силам, изгибающим моментам вокруг двух главных осей в плоскости его поперечного сечения и крутящим моментам вокруг его центральной оси. На рисунке 34 показаны два узла ( $I$  и  $J$ ), которые определяют отрезок балки и двенадцать сил: осевые ( $S1$ ,  $S7$ ), сдвиговые ( $S2$ ,  $S3$ ,  $S8$ ,  $S9$ ), а также изгибающие ( $S5$ ,  $S6$ ,  $S11$ ,  $S12$ ) и крутящие моменты ( $S4$ ,  $S10$ ).

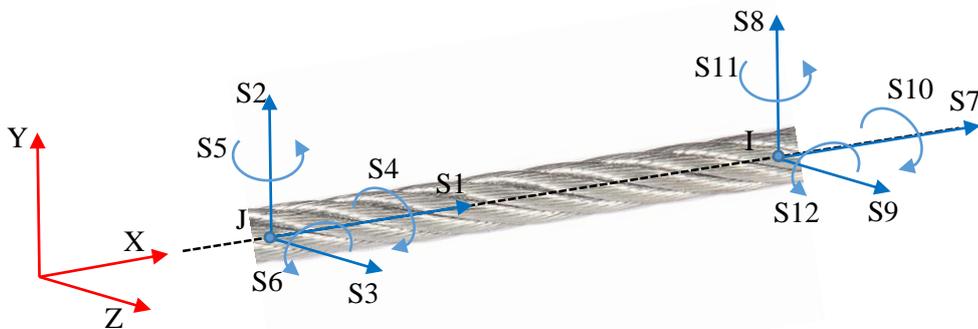


Рисунок 34 – Элемент балки Тимошенко

В отличие от линейной модели стержня Тимошенко [137], которая используется в Adams по умолчанию, нелинейная постановка за счет дополнительных членов в уравнениях силы / крутящего момента помогает стабилизировать численное решение, когда элементы стержня в модели подвержены высоким осевым нагрузкам. В решателе Adams используются

следующие определяющие уравнения, чтобы применить силу и крутящий момент к  $I$ -му маркеру (61)

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = \{F_0\} - N \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 6/5L & 0 & 0 & 0 & -1/10 \\ 0 & 0 & 6/5L & 0 & 1/10 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1/10 & 0 & 2L/15 & 0 \\ 0 & -1/10 & 0 & 0 & 0 & 2L/15 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x-L \\ y \\ z \\ a \\ b \\ c \end{Bmatrix}, \quad (61)$$

где  $N = K_{11}(x-L) + d$  – осевая сила стержня,  $d$  – вязкое демпфирование,  $\{F_0\}$  – силы и крутящий момент  $I$ -го узла, вычисленным по линейной модели стержня Тимошенко (62)

$$\begin{Bmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ T_x \\ T_y \\ T_z \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{11} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & K_{22} & 0 & 0 & 0 & K_{26} \\ 0 & 0 & K_{33} & 0 & K_{35} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & K_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_{53} & 0 & K_{55} & 0 \\ 0 & K_{62} & 0 & 0 & 0 & K_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x-L \\ y \\ z \\ a \\ b \\ c \end{Bmatrix} - \begin{bmatrix} c_{11} & c_{21} & c_{31} & c_{41} & c_{51} & c_{61} \\ c_{21} & c_{22} & c_{32} & c_{42} & c_{52} & c_{62} \\ c_{31} & c_{32} & c_{33} & c_{43} & c_{53} & c_{63} \\ c_{41} & c_{42} & c_{43} & c_{44} & c_{54} & c_{64} \\ c_{51} & c_{52} & c_{53} & c_{54} & c_{55} & c_{65} \\ c_{61} & c_{62} & c_{63} & c_{64} & c_{65} & c_{66} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} V_x \\ V_y \\ V_z \\ \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{Bmatrix}. \quad (62)$$

где  $x, y, z$  – поступательные смещения  $I$ -го узла относительно  $J$ -го узла, измеренные в системе координат  $J$ -го узла;  $a, b, c$  – относительные смещения вращения  $I$ -го узла относительно  $J$ -го узла, выраженные соответственно по осям  $x, y, z$   $J$ -го узла;  $F_x, F_y, F_z$  и  $T_x, T_y, T_z$  – компоненты поступательной силы и силы вращения (крутящего момента) в системе координат  $J$ -го узла;  $L$  – недеформированная длина балки вдоль оси  $x$ ;  $V_x, V_y, V_z$  – производные по времени от  $x, y, z$  соответственно;  $\omega_x, \omega_y, \omega_z$  – компоненты угловой скорости  $I$ -го узла относительно  $J$ -го узла, видимой  $J$ -м узлом и измеренной в системе координат  $J$ -го узла;  $K_{ij}, c_{ij}$  – элементы матриц жесткости и демпфирования, обе матрицы являются симметричными. Элементы матрицы жесткости вычисляются следующим образом (63)

$$K_{11} = \frac{ES_0}{L} R_{kx},$$

$$\begin{aligned}
K_{22} &= \frac{12EI_{zz}}{L^3(1+p_y)}, \\
K_{26} &= -\frac{6EI_{zz}}{L^2(1+p_y)}, \\
K_{33} &= \frac{12EI_{yy}}{L^3(1+p_z)} R_{kb}, \\
K_{35} &= \frac{6EI_{yy}}{L^2(1+p_z)} R_{kb}, \\
K_{44} &= \frac{GI_{xx}}{L} R_{kt}, \\
K_{55} &= \frac{(4+p_z)EI_{yy}}{L(1+p_z)} R_{kb}, \\
K_{66} &= \frac{(4+p_y)EI_{zz}}{L(1+p_y)} R_{kb},
\end{aligned} \tag{63}$$

где  $E, G$  – модуль Юнга и сдвига соответственно;  $S_0$  – площадь поперечного сечения стержня;  $p_y = 12EI_{zz}ASY / (GS_0L^2)$ ,  $p_z = 12EI_{yy}ASZ / (GS_0L^2)$ ,

$$ASY = \frac{S_0}{I_{yy}^2} \int \left( \frac{Q_y}{I_z} \right)^2 dS_0, \quad ASZ = \frac{S_0}{I_{zz}^2} \int \left( \frac{Q_z}{I_y} \right)^2 dS_0 \quad - \text{ поправочные коэффициенты}$$

(отношение площади сдвига для отклонения сдвига в направлении  $y$  и  $z$  соответственно);  $Q_y$  и  $Q_z$  – статический момент площади поперечного сечения,

которая должна быть срезана силой в направлении  $z$  и  $y$  соответственно;  $l_z$  и  $l_y$

– размер поперечного сечения в направлении  $z$  и  $y$  соответственно;  $I_{xx} = \frac{\pi D^4}{32}$  –

полярный момент инерции;  $I_{yy} = I_{zz} = \frac{\pi D^4}{64}$  – моменты инерции поперечного

сечения балки относительно нейтральных осей;  $D$  – диаметр поперечного сечения (для сплошного круглого сечения). Множители жесткости в осевом, изгибном и крутильном направлениях доступны для ввода в интерфейсе Adams и

являются инструментом для задания свойств ортотропного материала. Таким образом, элемент стержня, включающий в себя два узла, обладающих массой, и силу, действующую между ними, для решателя Adams подобен элементам в большинстве программ с конечными элементами, поскольку матрица жесткости, которую вычисляет Adams, является стандартной матрицей жесткости элементов стержня.

Сценарий симуляции включает в себя подготовительный этап и этап целевых воздействий. На подготовительном этапе, начинающемся с динамического расчета, происходит отсоединение шкива от провода и плавное провисание провода в полете с задаваемой при помощи тяговой системы силой натяжения, после чего выполняется статический расчет, чтобы привести провод в состояние равновесия. Продолжительность подготовительного этапа должна быть больше, чем продолжительность работы тяговой системы. Код скрипта симуляции подготовительного этапа выглядит следующим образом:

```
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.0, STEPS=300
SIMULATE/STATIC
```

После завершения подготовительного этапа возможен запуск целевого расчета. Целевые воздействия на провод могут задаваться несколькими способами в зависимости от назначения.

*Свободные колебания провода под воздействием силы, изменяющейся по известному закону.* Такой тип воздействия задается при помощи объектов forces (силы). Сила прикладывается к элементу провода в одном из заданных направлений. Например, плавно возрастающая / убывающая сила 20 кН задается при помощи выражения STEP (рисунок 35):

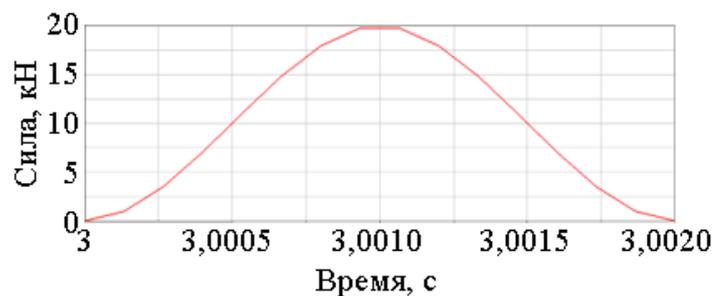


Рисунок 35 – График изменения действующей силы

STEP(TIME,3,0,3.001,20000)+STEP(TIME,3.001,0,3.002,-20000)

*Свободные колебания провода под воздействием физического маятника.* Такой тип воздействия требует создания модели маятника с заданными массогабаритными параметрами. Точка закрепления и начальное отклонение маятника задаются на этапе моделирования (рисунок 36).

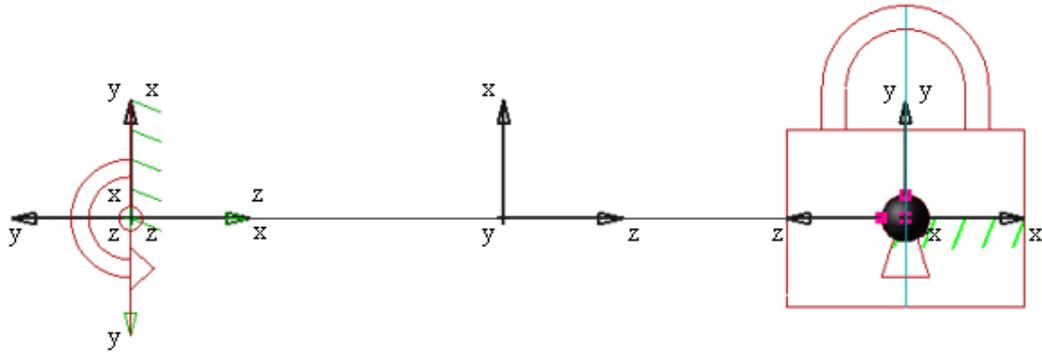


Рисунок 36 – Модель маятника

Запуск маятника осуществляется в определенный момент времени расчета при помощи отключения соединителя типа неподвижный шарнир (fixed joint). В этом случае код скрипта симуляции подготовительного этапа выглядит следующим образом:

```
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.0, STEPS=300
```

```
SIMULATE/STATIC
```

```
DEACTIVATE/JOINT, ID=48
```

*Колебания провода с прикрепленным устройством.* Такой тип воздействия требует создания модели устройства с заданными массогабаритными параметрами основных элементов: индуктора, бойка, штанг, корпуса. Возвратные пружины создаются как spring-damper force (пружинные демпферы), им задается значение preload (силы преднатяжения). Крепление устройства на проводе задается при помощи contact (силы контакта) (рисунок 37).

Код скрипта симуляции этапа целевых воздействий выглядит следующим образом:

```
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2, STEPS=15000
```

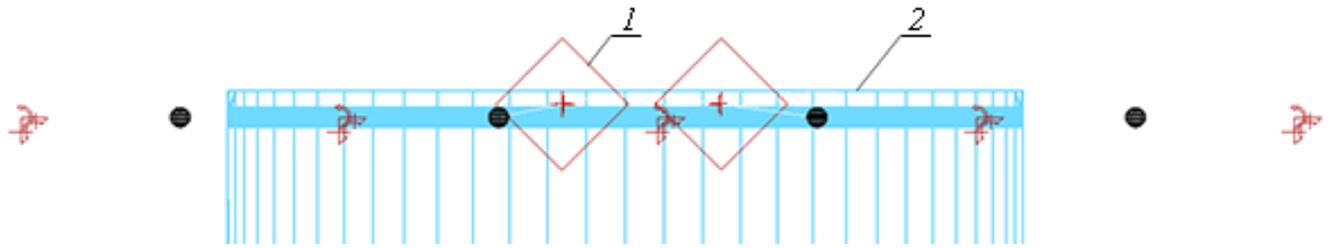


Рисунок 37 – Крепление устройства к проводу (вид сверху):

1 – сила контакта; 2 – устройство

Присоединение объектов к проводу, таких как капли или трубка льда, выполняется за счет соединителя типа *fixed joint* (неподвижный шарнир). При чем присоединить один элемент к другому возможно только если они оба относятся к объектам типа *bodies* (тела), то есть обладают массогабаритными параметрами. В модели провода только узлы являются телами. Поскольку критерий разрушения трубки льда связан с изгибной деформацией, то для реализации такой модели требуется размещение узлов провода практически вплотную. Такая реализация значительно увеличит время расчета, особенно для провода длиной до сотен метров.

Капли, за счет их малости, незначительно увеличивают массу пролета, поэтому моделирование малого количества капель только в выбранных точках не влияет на результаты моделирования. На рисунке 38 изображен узел провода с присоединенной каплей.

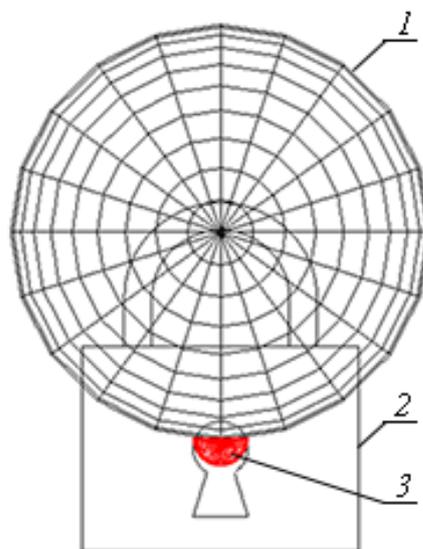


Рисунок 38 – Модель элемента провода с присоединенной каплей: 1– элемент провода, 2 – крепление капли, 3 – капля

Общий принцип проверки выполнения критерия отсоединения присоединенных к проводу элементов, будь то капля или элемент трубки льда, заключается в установке sensors (датчиков), следящих за значением контрольного параметра. При достижении параметром критического значения происходит отключение связи между элементами. Код скрипта симуляции подготовительного этапа и этапа целевых воздействий при этом выглядит следующим образом:

```

DEACTIVATE/SENSOR, ID=1,2,...,n
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.0, STEPS=300
SIMULATE/STATIC
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2, STEPS=15000
ACTIVATE/SENSOR, ID=1,2,...,n
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2, STEPS=15000
DEACTIVATE/SENSOR, ID=1
DEACTIVATE/JOINT, ID=1
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2, STEPS=15000
DEACTIVATE/SENSOR, ID=2
DEACTIVATE/JOINT, ID=2
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2, STEPS=15000
...
DEACTIVATE/SENSOR, ID=n
DEACTIVATE/JOINT, ID=n
SIMULATE/DYNAMIC, END=3.2, STEPS=15000

```

### 3.3 Проверка адекватности численной модели провода

В программном комплексе построены модели трех различных марок проводов (таблица 5), в том числе, использующихся в практике мировых энергосетевых компаний. Длины пролетов для каждого провода выбраны согласно доступным экспериментальным данным [34, 138] о стреле провеса и тяжении. Для всех трех марок проводов использованы следующие коэффициенты жесткости: на

растяжение – 1, на изгиб –  $2^{-5}$ , на кручение –  $2,5^{-4}$ , коэффициент демпфирования –  $9^{-3}$ , шаг дискретизации – 5.

Проведена проверка адекватности построенных моделей проводов по статическим параметрам. Выявлено, что изменение шага дискретизации незначительно влияет на результаты моделирования. В таблице 6 приведены результаты численных расчетов при шаге дискретизации равном 5. Отклонение по всем параметрам экспериментального исследования от результатов моделирования составило не более 3,2 %.

Таблица 5 – Параметры проводов

Параметр	Марка провода, значение		
	RR-W-410D	AC120/19	Стальной провод
$p$ , погонный вес провода, кг/м	0,0700	0,4710	0,8398
$S_0$ , площадь поперечного сечения провода, мм <sup>2</sup>	13,20	136,43	100,88
$\rho$ , плотность, кг/м <sup>3</sup>	5302,00880	2591,00000	6327,02112
$D$ , диаметр провода, мм	4,1	15,2	13,0
$E$ , модуль Юнга, ГПа	80,0	82,5	181,4
$F_u$ , прочность на растяжение, кН	10,700	41,521	128,120

Проведена проверка сходимости построенной модели провода на статическое нагружение при различной дискретизации модели. К свободному концу провода AC120/19 длиной 0,5 м, имеющему консольное крепление на другом конце, приложена статическая нагрузка. Полученное расхождение по отклонению экспериментального исследования от результатов моделирования составило не более 2 % при шаге дискретизации равном или большем пяти (рисунок 39). При шаге дискретизации равном трем наблюдается рост расхождения с экспериментальными данными по мере увеличения статической нагрузки.

Проверка адекватности модели на динамический расчет приведена с учетом имеющихся экспериментальных данных: для консольно закрепленного провода

длиной 0,5 м на свободные колебания и для пролета 4 м при ударе по центру пролета снизу.

Таблица 6 – Сравнение результатов экспериментальных данных и расчетов (статический расчет)

Параметры сравнения		Марка провода, расстояние между опорами		
		RR-W-410D, 4 м	АС120/19, 200 м	Стальной провод, 300 м
$f$ , стрела провеса, мм	Эксперимент	240,000	5701,208	5500,000
	Adams	243,930	5866,472	5628,000
$N$ , тяжение, кН	Эксперимент	0,005860	4,055	16,834
	Adams	0,005703	3,930	16,484
$L$ , длина кабеля, м	Эксперимент	4,0216	200,2437	300,1513
	Adams	4,0060	200,2300	300,1400
$m$ , масса кабеля, кг	Эксперимент	0,2800	94,0317	251,9400
	Adams	0,2802	94,6110	252,5192

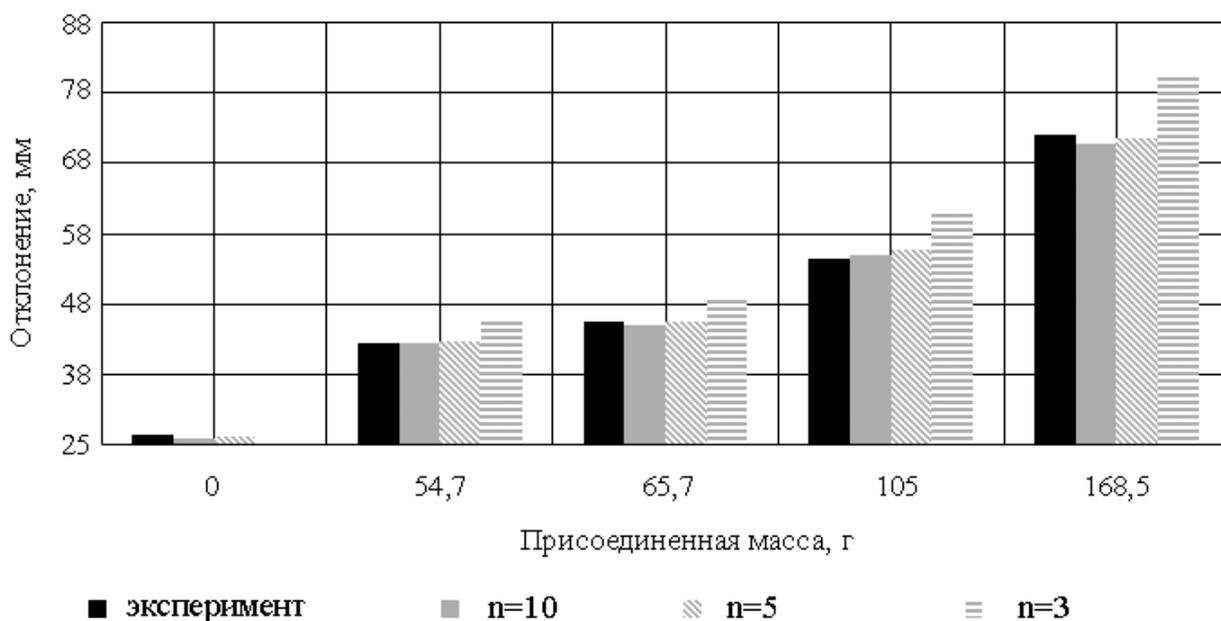


Рисунок 39 – Сходимость результатов при отклонении провода длиной 0,5 м с присоединенной массой

Экспериментально получен график собственной частоты затухающих колебаний для консольно закрепленного провода (рисунок 40). Полученное расхождение по частоте свободных колебаний экспериментального исследования

от результатов моделирования составило не более 10 % при шаге дискретизации равном пяти. Отмечено, что коэффициент жесткости на растяжение влияет на результаты расчета незначительно, однако, выбор остальных коэффициентов зависит от количества элементов на метр, что объясняется зависимостью коэффициентов для матрицы жесткости, сил и крутящих моментов от длины элемента –  $L$  – расстояния между  $I$  и  $J$  маркерами.

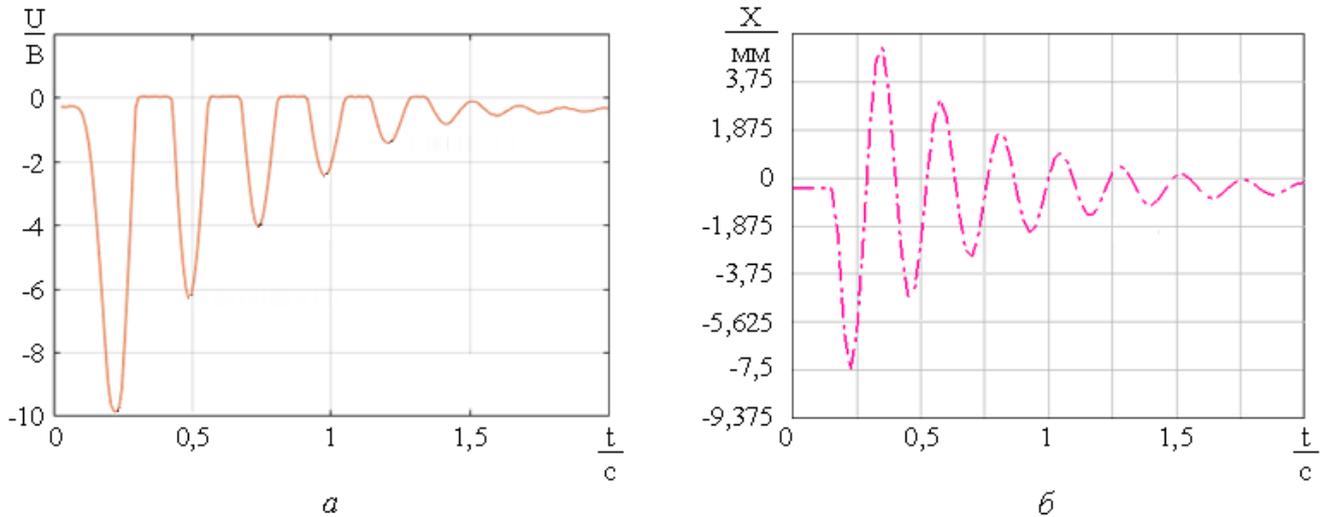


Рисунок 40 – График собственной частоты затухающих колебаний: а – эксперимент; б – расчет

В Adams смоделирована форма нагрузки [138], прикладываемой к 4-метровому пролету и получены значения максимального отклонения в середине пролета (рисунок 41) и тяжения (рисунок 42).

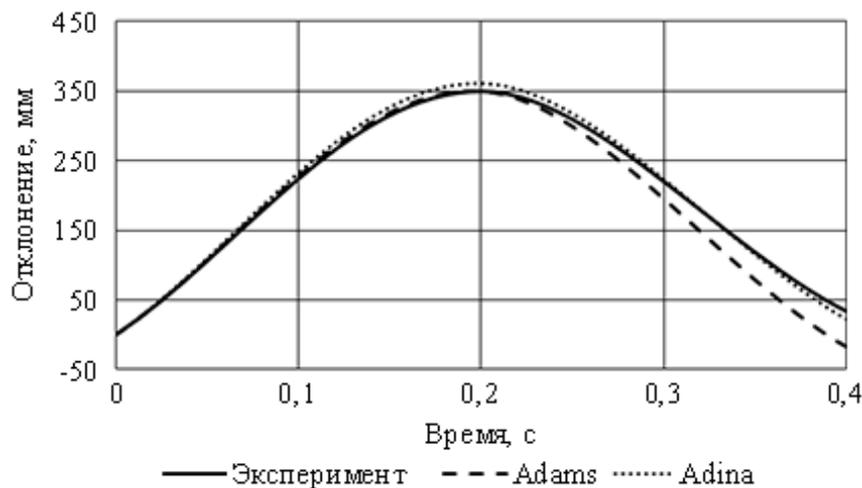


Рисунок 41 – Сравнение численных результатов и экспериментальных данных по отклонению середины пролета

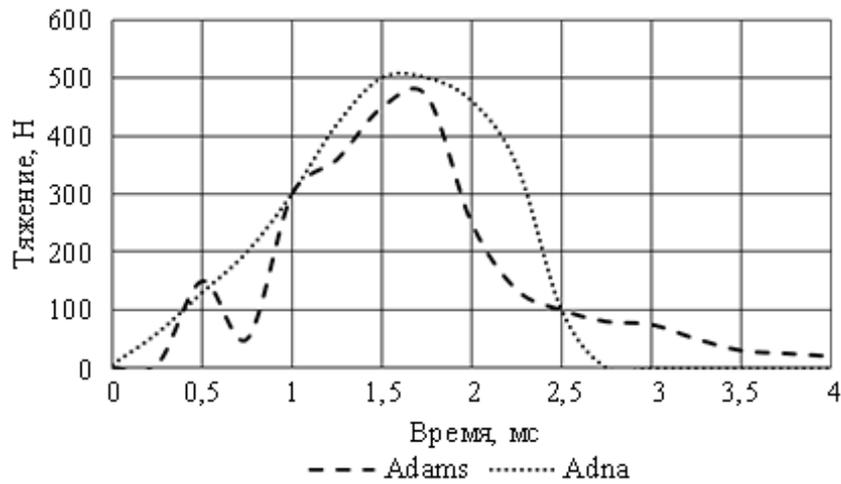


Рисунок 42 – Сравнение численных результатов по тяжению

Расхождение по отклонению середины пролета экспериментального и стороннего численного исследования от результатов моделирования составило не более 0,3 % при шаге дискретизации 5 элементов на метр. Полученное расхождение по пиковому значению тяжения стороннего численного исследования от результатов моделирования составило не более 6 %.

Проведена проверка сходимости на модели пролета 4 м на динамическое нагружение при различной дискретизации модели. Для получения сходящихся результатов с экспериментальными данными расстояние между элементами не должно превышать 23,5 см. Это обеспечивает точность и хорошую вычислительную эффективность (рисунок 43). Таким образом, подтверждена адекватность и сходимость построенной численной модели провода.

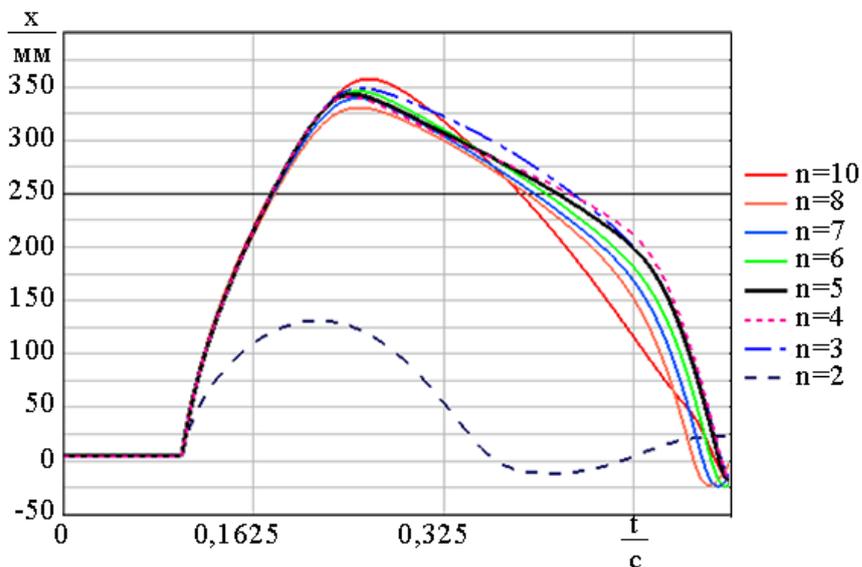


Рисунок 43 – Сравнение смещения средней точки при разных размерах сетки

### 3.4 Анализ влияния способа крепления устройства на движение провода

Численные эксперименты проведены на модели провода ЛЭП марки АС120/19 в пролете 200 м. Без устройства расчетная в Adams стрела провеса составляет 5,88 м, тяжение – 3,93 кН. Концы провода шарнирно закреплены. При боковом типе крепления между проводами размещено устройство массой 10 кг (рисунок 44), из которых: 2 кг составляет кожух, не участвующий в ударном воздействии на провод; по 4 кг составляют массы со стороны индуктора и бойка. Жесткость возвратной пружины равна 47,099 Н/мм, сила преднатяжения пружины равна 32,362 Н. Расчетное в Adams тяжение каждого провода под весом устройства – 4,44 кН, стрела провеса – 6,06 м. Расчетная скорость бегущей волны 97,09 м/с. Расчетная собственная частота колебаний провода – 0,2427 Гц.

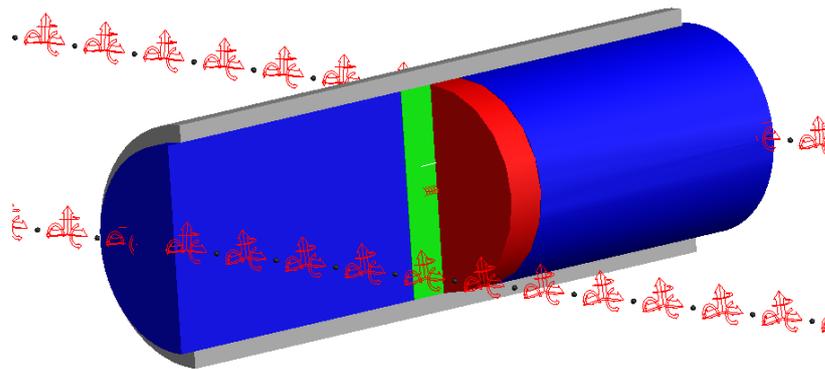


Рисунок 44 – Модель устройства при боковом типе крепления

При нижнем типе крепления на проводе размещено устройство массой 8 кг (рисунок 45), из которых: 4 кг составляет масса индуктора, отталкиваемого вниз, 4 кг – масса бойка и остальной части устройства, прикрепленных проводу, отталкиваемых вверх. Жесткость возвратной пружины равна 47,099 Н/мм, сила преднатяжения пружины равна силе тяжести индуктора. Расчетное тяжение провода под весом устройства – 4,45 кН, стрела провеса – 6,09 м. Расчетная скорость бегущей волны 97,21 м/с. Расчетная собственная частота колебаний провода – 0,2430 Гц.

Радиус распространения эффективного и безопасного воздействия устройства принят равным половине длины пролета минус 1,75 % от длины пролета, что соответствует 3,5 м от концов пролета. В дальнейшем эта точка называется

концом пролета. ЭМС моделируется как сила с максимальным значением  $F_{уд}$ , импульсно возрастающая и затем убывающая в течение времени  $t_{уд}$ . Рассмотрены удары силой от 10 до 30 кН и длительностью от 25 до 25000 мкс. Результаты проанализированы в зависимости от импульса силы (64)

$$I = F_{уд}t_{уд}. \quad (64)$$

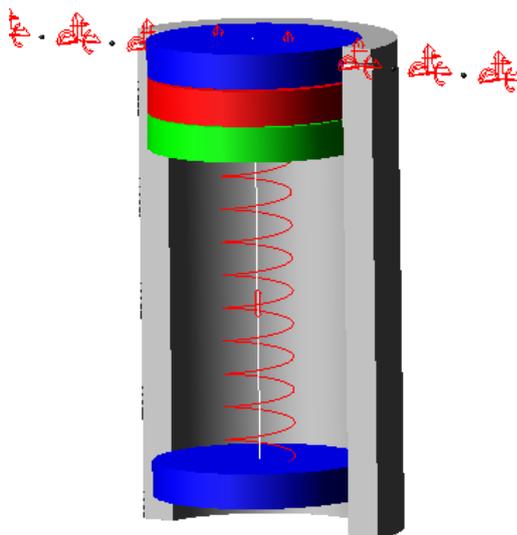


Рисунок 45 – Модель устройства при нижнем типе крепления

Приведены типичные графики положения провода в горизонтальной плоскости при ударе сбоку (рисунок 46а) и в вертикальной плоскости при ударе снизу (рисунок 46б). Для наглядности при ударе снизу колебания приведены относительно положения покоя. Центральная точка провода (100 м) – место крепления устройства. Из графиков видно, что при ударе сбоку по проводу распространяются в обе стороны от удара одиночные бегущие полуволны; при ударе снизу – волновые пакеты, которые возникают в связи с множественными соударениями индуктора и бойка.

Исследована амплитуда отклонения провода в центре и на конце пролета. При постоянном импульсе силы с уменьшением времени удара до некоторого значения и, соответственно, увеличением силы удара, наблюдаются рост амплитуды колебаний по всей длине пролета (рисунки 47, 48). Для удара сбоку наибольшие амплитуды колебаний наблюдаются при длительности удара 250 мкс, для удара снизу – 2500 мкс.

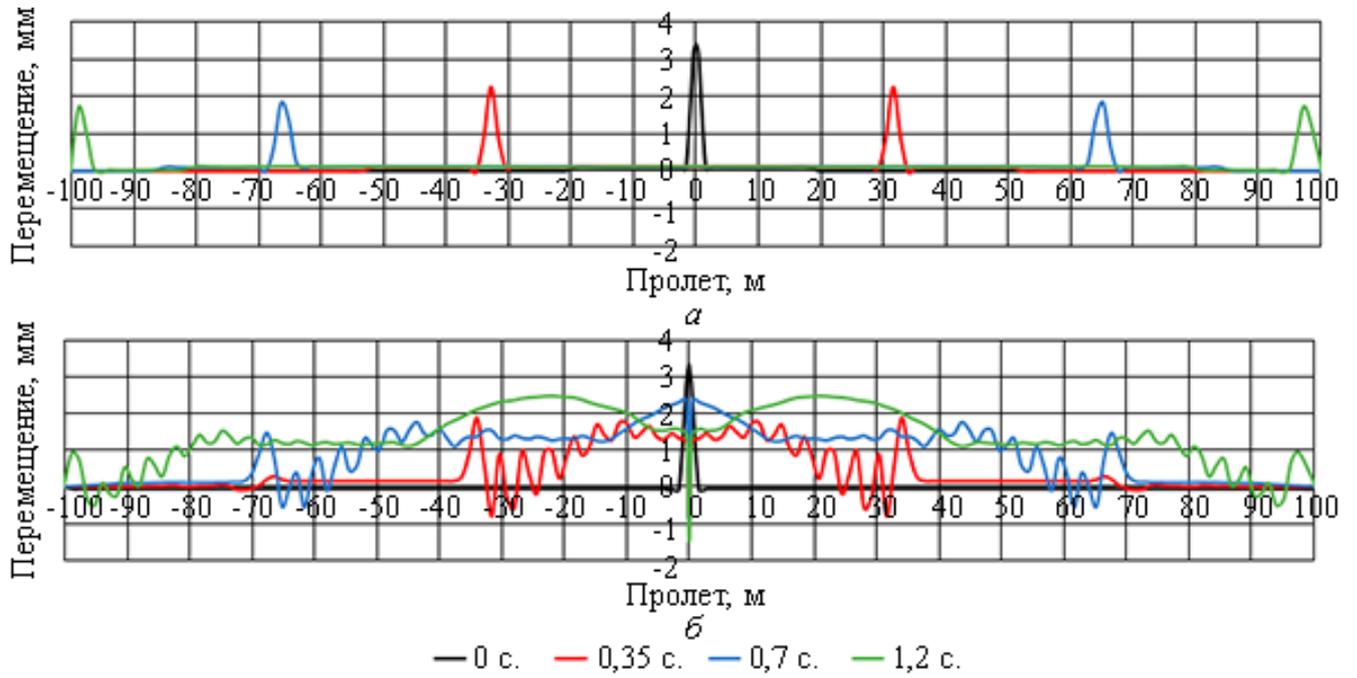


Рисунок 46 – График положения провода при ударе 250 мкс, 20 кН: а – сбоку, б – снизу

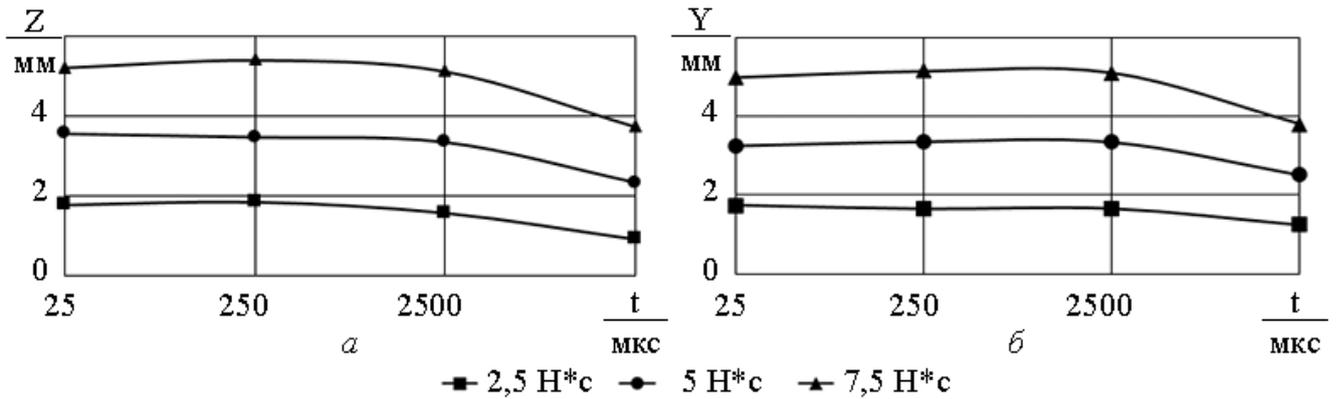


Рисунок 47 – Амплитуда отклонения в центре пролета: а – удар сбоку, б – удар снизу

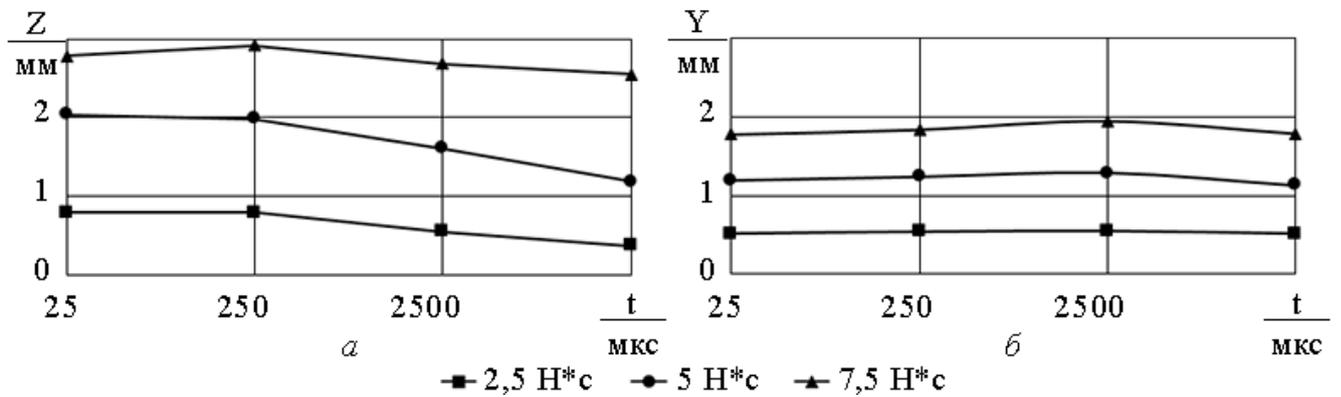


Рисунок 48 – Амплитуда отклонения на конце пролета: а – удар сбоку, б – удар снизу

Дальнейшее уменьшение времени удара приводит к тем же амплитудам либо меньшим. Увеличение импульса силы удара всегда соответствует росту амплитуды бегущей волны. Амплитуды отклонения в центре пролета при различных направлениях удара отличаются незначительно: при ударе сбоку амплитуды в среднем на 2 % больше, чем при ударе снизу. Однако, на конце пролета при ударе снизу находится в среднем в пределах  $\pm 42\%$ . То есть колебания затухают сильнее при ударе снизу, чем при ударе сбоку.

Тяжение достигает своего максимального значения в начале удара (рисунок 49). По этой причине изменение силы и времени удара влияют на максимальное тяжение так же, как на амплитуду отклонения в центре пролета. Однако, если при боковом ударе максимальное тяжение превышает начальное на 2-9 %, то при нижнем ударе – на 12-36 %. Следует отметить, что при любых ударах максимальное тяжение не превышает разрывного усилия провода АС120/19, равного 41,521 кН. Максимальное тяжение может быть уменьшено путем увеличения времени удара или уменьшения импульса силы удара.

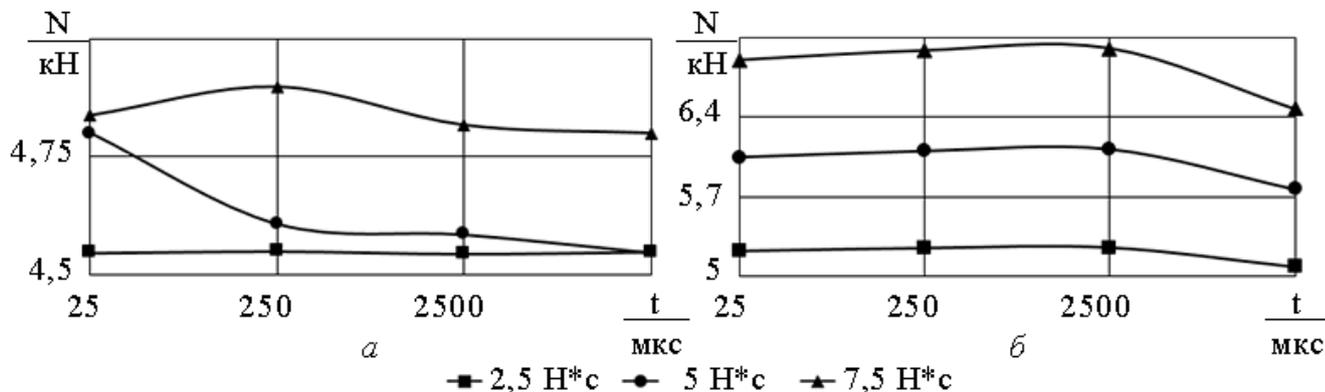


Рисунок 49 – Максимальное тяжение: а – удар сбоку, б – удар снизу

Рассмотрен вопрос опасности повреждения проводов при воздействиях устройством. Согласно формуле (34) рассчитан угол вибрации в месте крепления устройства как наибольший по амплитуде для обоих типов крепления. Учитывая, что длина волны при ударах устройством в рассматриваемом диапазоне времен и сил воздействий составляет 6,16 м, угол вибрации при ударе снизу не превышает  $18,06'$ , при ударе сбоку –  $18,92'$ , что на 37 % меньше угла вибрации при ветровых нагрузках [119]. На угол вибрации параметры удара влияют также, как на амплитуду бегущей волны при соответствующих способах крепления. Это

связано с тем, что угол вибрации прямо пропорционален амплитуде отклонения и обратно пропорционален длине волны. Изгибные напряжения в проволоках наружного повива в местах крепления устройства и подвески в соответствии с формулой (35) не превышают  $3,85 \text{ Н/мм}^2$  при ударе снизу и  $3,7 \text{ Н/мм}^2$  при ударе сбоку и изгибной жесткости провода равной  $159,65 \text{ Н*м}^2$  [139]. При таких изгибных напряжениях допустимое число циклов колебаний в соответствии с формулой (38) более  $10^{10}$  раз.

Исследована реакция провода на воздействие при значительном увеличении импульса силы удара и уменьшении коэффициента жесткости возвратной пружины. Для примера рассмотрен боковой удар, импульс силы которого задан равным  $22,5 \text{ Н*с}$  за счет времени удара  $0,025 \text{ с}$  и силы удара  $900 \text{ Н}$ . При этом уменьшена жесткость пружины до  $0,047099 \text{ Н/мм}$  и сила преднатяжения пружины до  $3,236 \text{ Н}$ . В результате в проводе распространяется волна, длина которой сопоставима с длиной пролета (рисунок 50).

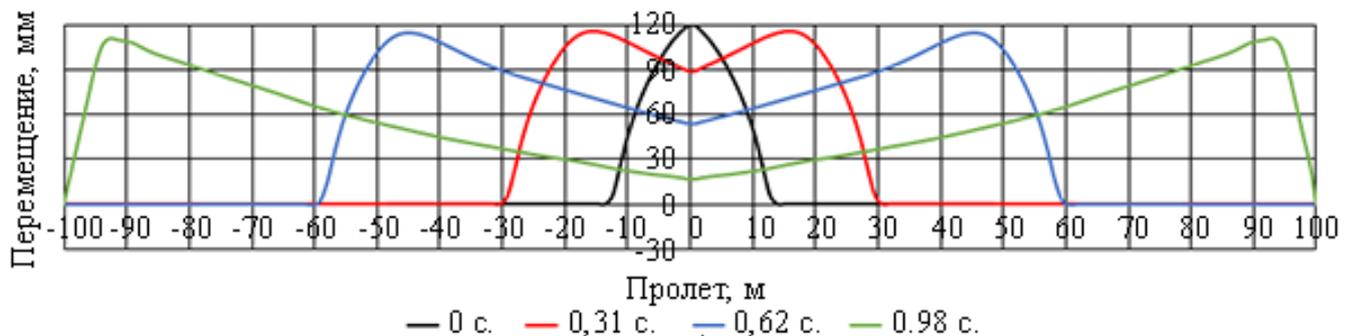


Рисунок 50 – График положения провода при ударе сбоку  $0,025 \text{ с}$ ,  $900 \text{ Н}$

При этом амплитуда волны составляет  $119 \text{ мм}$  – почти в сто раз больше амплитуды волны, формируемой при ударах импульсом силы  $2,5 \text{ Н*с}$ ; максимальное тяжение –  $8,84 \text{ кН}$  (что почти в 2 раза больше), пик тяжения приходится на момент достижения бегущей волной конца пролета; угол вибрации –  $83,3'$  (почти в 30 раз больше). Таким образом, получены закономерности влияния силы и времени удара на амплитуду отклонения провода в середине и на конце пролета, максимальное тяжение и угол вибрации для бокового и нижнего способов крепления устройства.

### 3.5 Анализ влияния способа крепления устройства на стряхивание капель

Дождевые капли имеют размеры от 0,5 до 6 мм [140] – средний диаметр, при превышении которого они, как правило, распадаются. В численных экспериментах рассматривается капля радиусом 2,5 мм и высотой 4,5 мм. Критическая масса такой капли, при достижении которой она отрывается от поверхности, согласно формуле (54) составляет 0,12 г с учетом того, что коэффициент поверхностного натяжения воды при 0°С составляет  $75,62 \cdot 10^{-3}$  Н/м [141]. Согласно формуле (58), ускорение, при котором происходит отрыв капли при ударе сбоку, составляет  $8,43 \text{ м/с}^2$ , при ударе снизу –  $3,13 \text{ м/с}^2$ , согласно формуле (59). Не менее важным, чем минимально необходимое ускорение, является достаточная амплитуда колебания. Для рассматриваемой капли, согласно формуле (60), амплитуда колебаний должна быть не меньше, чем 1,25 мм.

Параметры пролета, устройства и анализируемых ударов те же, что и в предыдущем параграфе. Исследовано ускорение, сообщаемое каплям, размещенным на проводе снизу по всей длине пролета. Далее приведены результаты исследований только для капель на конце пролета, как получивших наименьшее ускорение (рисунок 51) и амплитуду (рисунок 52).

При постоянном импульсе силы с уменьшением времени удара до некоторого значения и, соответственно, увеличением силы удара, наблюдаются рост ускорения присоединенной массы на конце пролета. Для удара сбоку наибольшие ускорения наблюдаются при длительности удара 250 мкс, для удара снизу – 2500 мкс. Дальнейшее уменьшение времени удара приводит к тем же ускорениям либо меньшим. Увеличение импульса силы удара всегда соответствует росту ускорения бегущей волны. Для обоих направлений удара существуют сочетания силы и времени удара, то есть импульса силы, обеспечивающие ускорение, достаточное для стряхивания капель воды по всей длине пролета. В целом, при ударе сбоку требуется больший импульс силы для сообщения минимально необходимого ускорения, чем при ударе снизу. Однако, для получения

минимально необходимых амплитуд отклонения при ударе сбоку требуется меньший импульс силы.

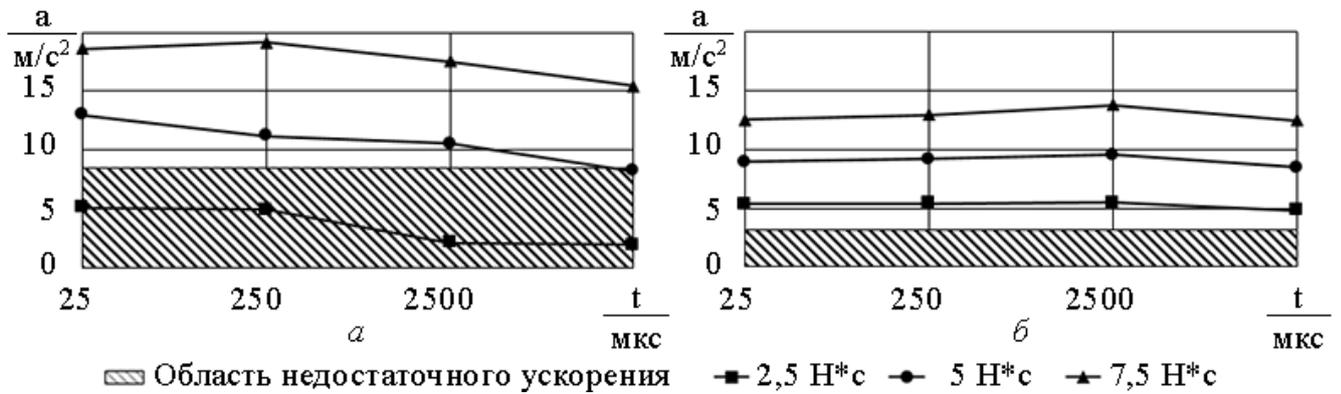


Рисунок 51 – Ускорение присоединенной массы на конце пролета: а – удар сбоку, б – удар снизу

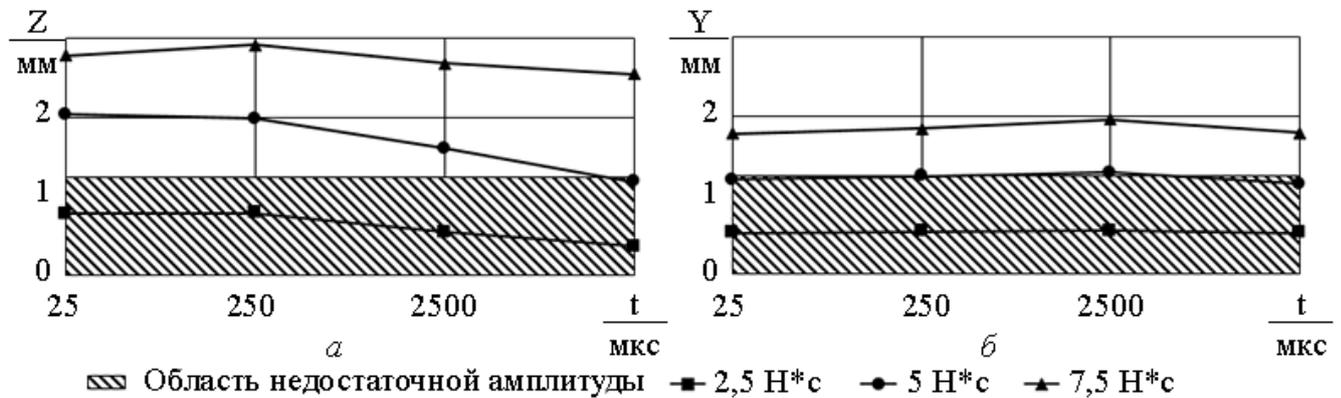


Рисунок 52 – Амплитуда отклонения на конце пролета: а – удар сбоку, б – удар снизу

Рассмотренное в предыдущем параграфе значительное увеличение импульса силы удара и уменьшение коэффициента жесткости возвратной пружины приводит к ускорению капли на конце пролета  $75,82 \text{ м/с}^2$ , что почти в 7 раз больше в сравнении с ударом импульсом силы  $2,5 \text{ Н}\cdot\text{с}$

Таким образом, получены закономерности влияния силы и времени удара на ускорение присоединенной массы для бокового и нижнего способов крепления устройства. В обоих случаях параметры удара влияют на ускорение так же, как на амплитуду бегущей волны. При ударе сбоку для достижения ускорения присоединенной массы и амплитуды отклонения, достаточной для отрыва капель от провода требуется меньший импульс силы, а значит меньшие амплитуды колебаний, скачки тяжения и угол вибрации. За счет этого обеспечивается

наибольшая безопасность работы устройства при достаточной эффективности. Кроме этого, выбор в пользу бокового способа крепления обоснован экономической целесообразностью за счет вдвое меньшего количества устройств, требуемых на пролет. Дальнейшие исследования проведены только для этого схемного решения.

### 3.6 Анализ влияния места крепления устройства на движение провода и стряхивание капель

В численных экспериментах проведено исследование влияния места крепления устройства на движение провода и стряхивание капель. Сравнение приведено для бокового способа крепления устройства на 1/2, 1/4 и 1/8 пролета (рисунки 46а, 53).

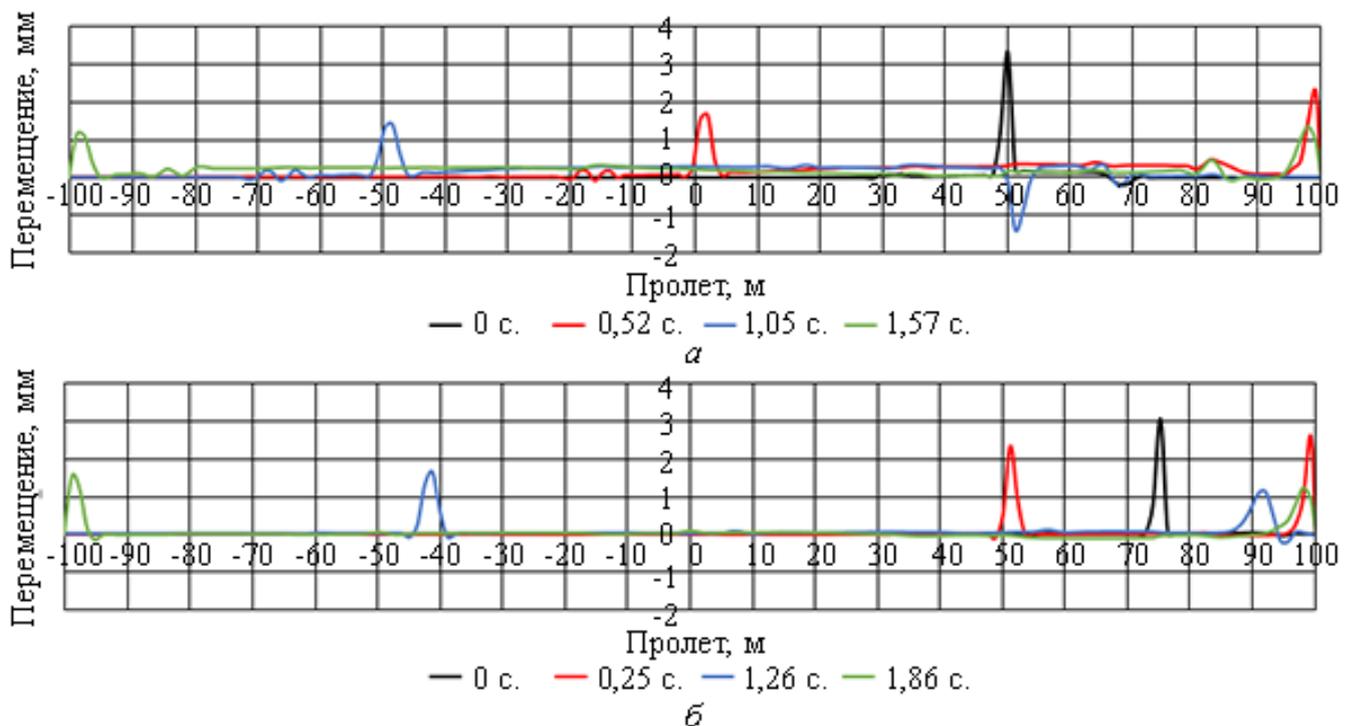


Рисунок 53 – График положения провода при ударе сбоку 250 мкс, 20 кН: а – 1/4 пролета, б – 1/8 пролета

Параметры пролета и устройства те же, что и в предыдущем параграфе. Для исследования выбраны параметры ударов, соответствующие импульсу силы 5 Н\*с. Крепление в центре, в отличие от смещенных, обеспечивает всегда большую амплитуду колебаний и большее ускорение присоединенного тела на конце

пролета (рисунок 54). То есть смещенные места крепления устройства требуют увеличения импульса силы удара для достижения необходимых амплитуд и ускорения.

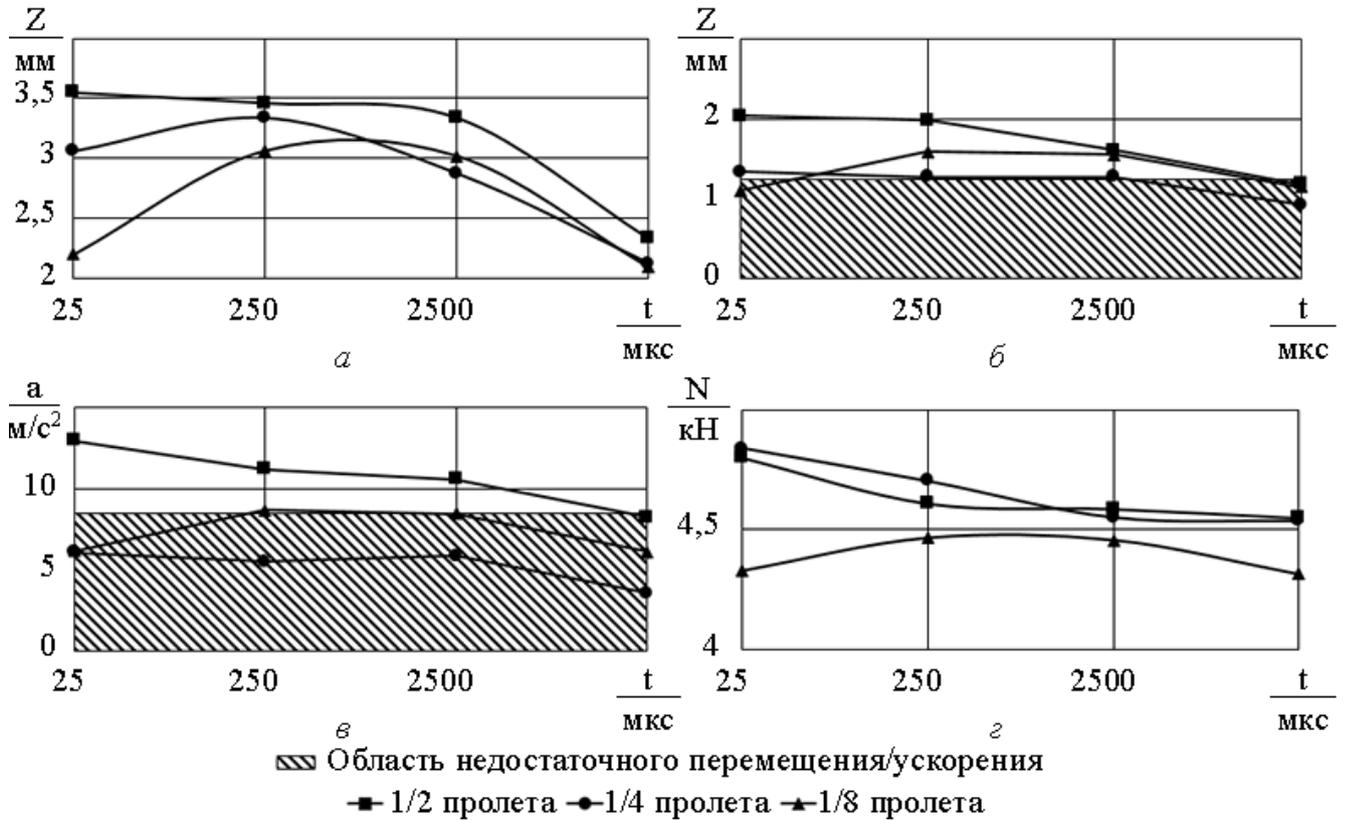


Рисунок 54 – Импульс силы удара 5 Н\*с (боковое крепление): а – амплитуда отклонения в месте удара, б – амплитуда отклонения на дальнем конце пролета, в – ускорение присоединенной массы на дальнем конце пролета, г – максимальное тяжение

Таким образом, подтверждено, что наилучшее место крепления устройства – в центре пролета.

Проведен анализ влияния требований к удару на параметры устройства для бокового способа крепления в сравнении ударов длительностью 250 и 2500 мкс. Расчеты выполнены в аналитической модели электродинамического взаимодействия ИС (Таблица 7).

При уменьшении импульса силы удара наблюдается снижение амплитуды силы тока. При увеличении времени удара при постоянном импульсе силы удара значительно снижается амплитуда тока. Однако, требуется увеличение емкости конденсаторной батареи, значительное увеличение количества витков индуктора

за счет увеличения его размеров и уменьшения ширины шины, увеличение размеров бойка.

Таблица 7 – Параметры устройства, обеспечивающие требуемый удар

Параметр	Значения					
Время удара, с	250*10 <sup>-6</sup>			2500*10 <sup>-6</sup>		
Сила удара, Н	10*10 <sup>3</sup>	20*10 <sup>3</sup>	30*10 <sup>3</sup>	1*10 <sup>3</sup>	2*10 <sup>3</sup>	3*10 <sup>3</sup>
Амплитуда тока, А	8*10 <sup>3</sup>	10*10 <sup>3</sup>	12*10 <sup>3</sup>	345	483	572
Внешний диаметр индуктора и бойка, м	0,2			0,3		
Внутренний диаметр индуктора и бойка, м	0,1			0,05		
Ширина шины индуктора, м	2*10 <sup>-3</sup>			0,5*10 <sup>-3</sup>		
Высота шины индуктора, м	5*10 <sup>-3</sup>			2,8*10 <sup>-3</sup>		
Высота бойка, м	5*10 <sup>-3</sup>			10*10 <sup>-3</sup>		
Ширина изоляционного слоя, м	2*10 <sup>-3</sup>			0,5*10 <sup>-3</sup>		
Количество витков спирали индуктора, шт.	8			83		
Паразитная индуктивность, Гн	2,5*10 <sup>-6</sup>			2,5*10 <sup>-6</sup>		
Паразитное активное сопротивление, Ом	9*10 <sup>-3</sup>			9*10 <sup>-3</sup>		
Емкость накопительного конденсатора, Ф	1,5*10 <sup>-3</sup>			3*10 <sup>-3</sup>		
Напряжение, до которого заряжается конденсатор, В	600	755	950	367	455	540
Суммарная отталкиваемая масса со стороны индуктора и бойка, кг	4*10 <sup>3</sup>			4*10 <sup>3</sup>		

### 3.7 Эксперименты на модельном пролете

Проведены экспериментальные исследования динамики провода при боковом способе крепления устройства в центре пролета. Полученные результаты приведены в сравнение с численными и аналитическими расчетами. Динамика провода при импульсном воздействии устройством приведена в сравнение с воздействием при помощи маятника, что соответствует удару при значительном уменьшении коэффициента жесткости возвратной пружины [142].

Для исследований создана экспериментальная установка [143], которая включает в себя витой провод и две металлические опоры, между которыми он крепится. Провод выполнен из высокоуглеродистой оцинкованной стали, погонный вес провода 0,012 кг/м, площадь поперечного сечения – 1,52 мм<sup>2</sup>, диаметр – 1,39 мм, модуль Юнга – 189,9 ГПа. Длина пролета – 7 м. Исследуемые стрелы провеса – 14 и 29 мм, при этом тяжение в пролете составляет 49 и 24 Н соответственно. По формуле (3) вычислена скорость распространения поперечных колебаний: для стрелы 14 мм – 63,9 м/с, для стрелы 29 мм – 44,7 м/с. Концы провода фиксируются в специальных зажимах и при помощи металлической петли крепятся к натяжным винтам. Винты фиксируются на металлических опорах и позволяют регулировать натяжение (рисунок 55). Измерение величины натяжения выполняется при помощи электронного динамометра, устанавливаемого между зажимом и натяжным винтом.

Перемещения двух произвольных точек провода в пределах пролета регистрирует разработанная измерительная система, в состав которой входят два прибора с оптическими датчиками. Функциональная схема прибора приведена на рисунке 56а, принципиальная схема измерительной системы приведена на рисунке 56б. Источником освещения является лазерный луч, приемником – фотодиод ВРW34 со временем нарастания 100 нс. Перемещение определяется по смещению объекта измерения – шторки, закрепленной на проводе, за счет чего меняется освещенность фотодиода. Благодаря тому, что оба прибора получают питание от химического источника, а для питания лазеров используется DC/DC

преобразователь (рисунок 57), выступающий дополнительным стабилизатором напряжения, обеспечивается высокая точность полученных сигналов.



Рисунок 55 – Крепление провода к опоре

В качестве регулятора интенсивности светового потока используется поляризатор, за счет чего при измерениях задействуется область только линейной зависимости обратного тока фотодиода от светового потока. Фотодиод включен в схему с операционным усилителем LM358, откуда происходит регистрация сигнала цифровым двухканальным осциллографом с памятью. Дискретизация АЦП по времени составляет 5 нс, по уровню – 1 мкВ. Так как величина перемещений провода при ударе не превышает 15 мм, то измерительная система настроена таким образом, что значения напряжений на фотодиоде в крайних положениях составляют 0,5 В для нулевой точки и 10,5 В для точки 15 мм. Таким образом, обеспечивается точность измерения перемещения около 1,5 мкм.

Перемещение определяется по смещению шторки, закрепленной на проводе (рисунок 58), за счет чего меняется освещенность фотодиода. Шторка выполнена из легкого материала, так, чтобы ее массой можно было пренебречь.

Цилиндрическая форма шторки обеспечивает точность измерений в случае, если при ударе происходит кручение провода вокруг осевой линии.

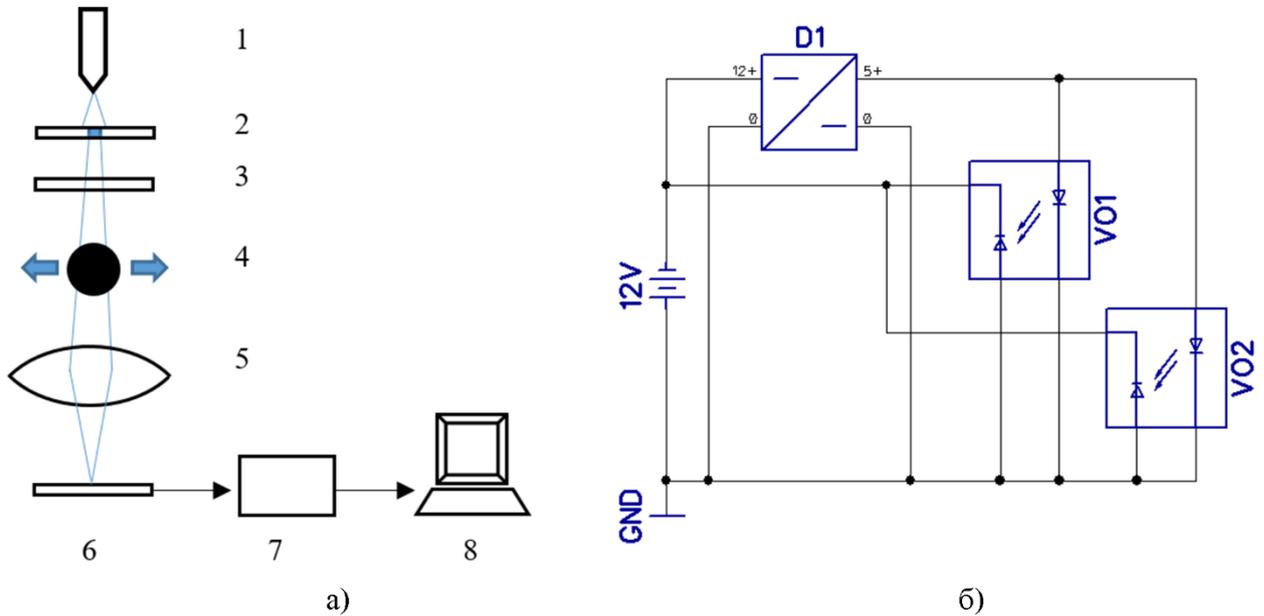


Рисунок 56 – Измерительная система: а – функциональная схема прибора с оптическим датчиком: 1 – лазер, 2 – экран с прямоугольным отверстием, 3 – поляризатор, 4 – объект измерения (стрелками указано направление движения), 5 – собирающая линза, 6 – фотоприемник, 7 – АЦП (осциллограф), 8 – ПК; б – принципиальная схема измерительной системы

Переданные на осциллограф значения сохраняются на компьютер в виде массива данных для дальнейшей обработки. Таким образом обеспечивается одновременная регистрация данных о колебаниях провода в двух произвольных точках пролета и их сохранение для дальнейшей обработки. Общий вид экспериментальной установки и измерительной системы приведен на рисунке 59.

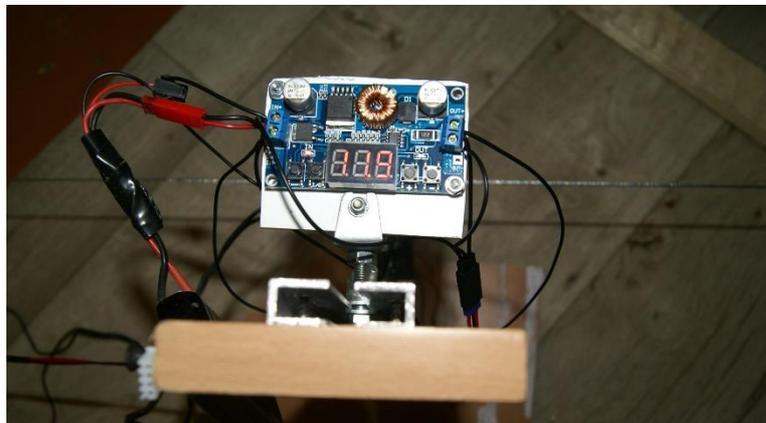


Рисунок 57 – DC/DC преобразователь

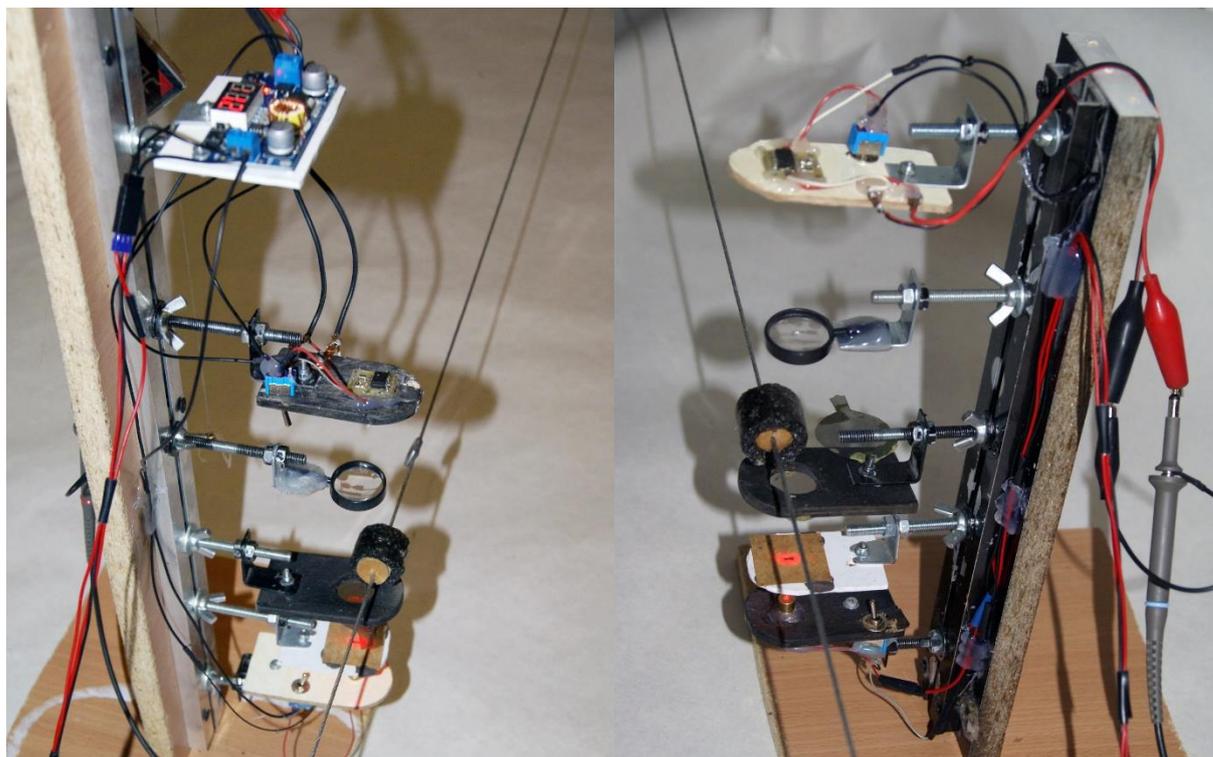


Рисунок 58 – Измерительные устройства с оптическим датчиком

Маятник, который в эксперименте передает проводу начальную скорость, имеет массу 2,1 г, подвешенную на нити длиной 325 мм (для стрелы провеса 14 мм) и 334 мм (для стрелы провеса 29 мм). Маятник выполняет удар по присоединенной к проводу массе (3 г), играющей роль отбойника. Таким образом, область контакта маятника с проводом равна диаметру отбойника – 5 мм.

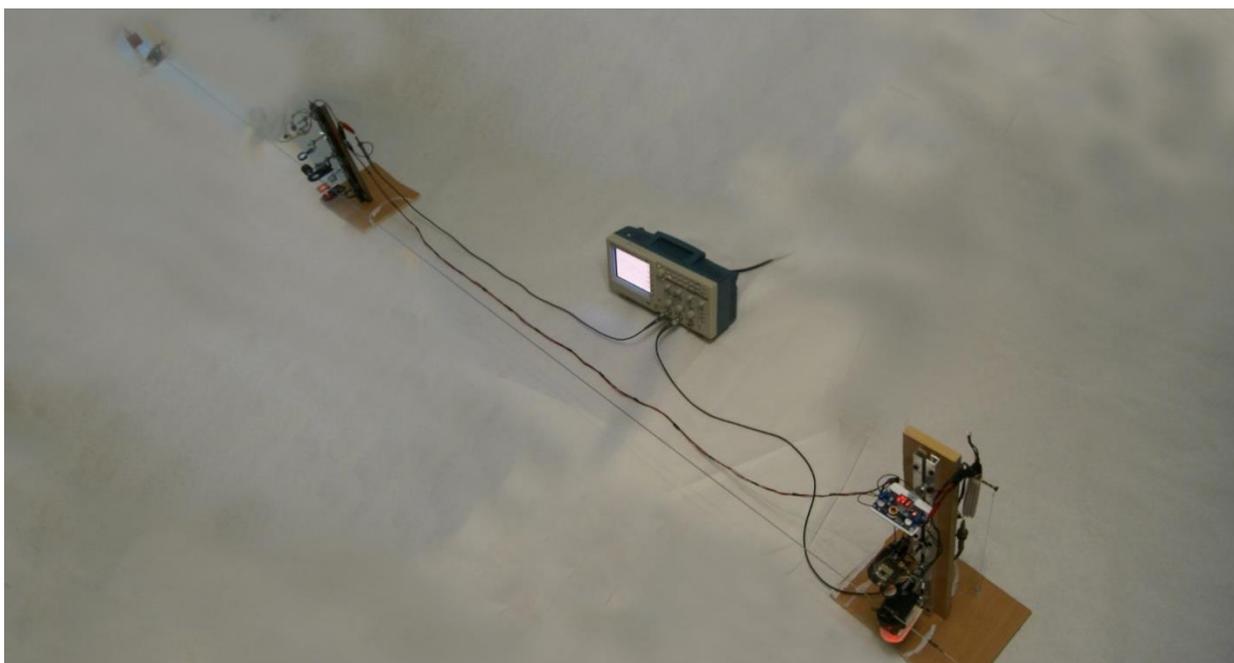


Рисунок 59 – Общий вид экспериментальной установки

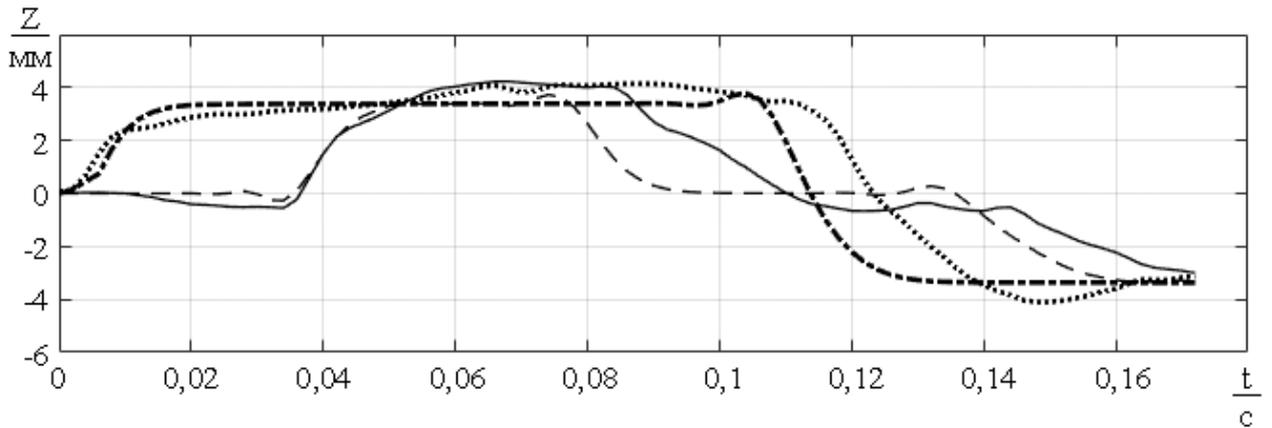
Конструкция маятника обеспечивает его колебания в плоскости, перпендикулярной оси провода, и, таким образом, точное попадание на отбойник. Угол отклонения маятника до удара составляет  $90^\circ$ . Точка подвеса маятника находится на 110 мм левее осевой линии провода. Удар маятником приходится на 100 мм слева от центра пролета. Расчетная скорость маятника в момент удара составляет 2,52 м/с (для стрелы провеса 14 мм) и 2,55 м/с (для стрелы провеса 29 мм).

Проведено 10 экспериментов для каждой стрелы провеса и получены осредненные значения колебаний центральной точки пролета (3,5 м) и точки пролета, отстоящей от нее на 2 м (1,5 м). Затем построена численная модель экспериментального пролета и маятника. Заданы параметры модели провода: шаг дискретизации – 29 элементов / метр, коэффициенты жесткости  $R_{kx}=1$ ,  $R_{kb} = R_{kt} = 0,1$ . Данные, полученные экспериментально приведены в сравнение с расчетными (рисунок 60).

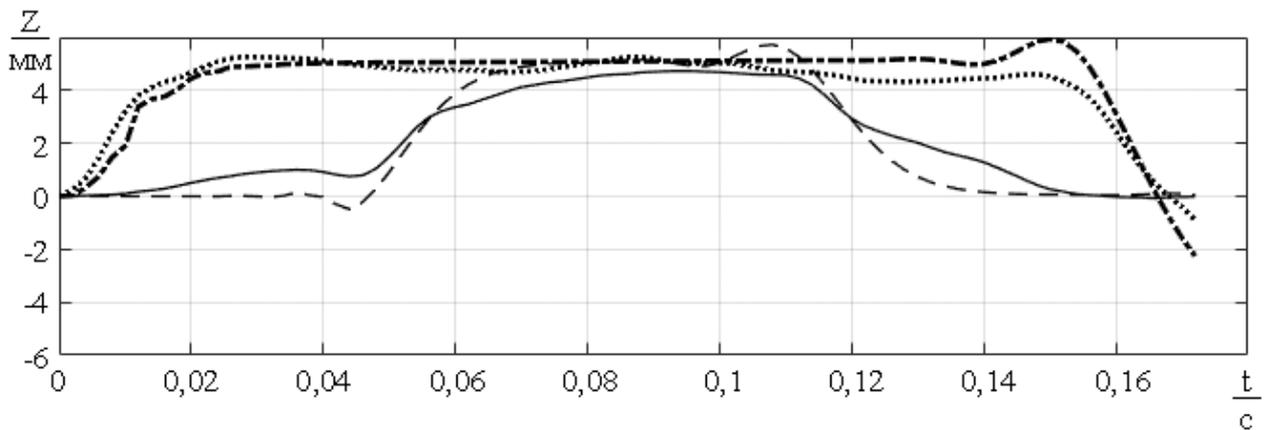
Из графиков видно, что в месте удара быстро возникает горб, который распространяется в проводе со скоростью бегущей волны, отражается от конца провода, опрокидывается, возвращается назад и снова опрокидывается. Расхождение экспериментальных и расчетных значений по скорости распространения колебания не превышает 1,6 %, по среднему значению амплитуды – 2,1 %. Таким образом, подтверждена адекватность расчетов, полученных на используемых математических моделях. Ускорение присоединенного тела на конце пролета составляет  $13,105 \text{ м/с}^2$  для стрелы провеса 14 мм и  $7,278 \text{ м/с}^2$  – для 29 мм. Максимальное тяжение составляет 56,84 Н для стрелы провеса 14 мм и 27,80 Н – для 29 мм.

Устройство на основе ЛИИЭП, которое в эксперименте оказывает импульсное воздействие, составляет 1/20 от массы провода в пролете, ширину контакта с проводом – 10 мм. Устройство оснащено возвратной пружиной с коэффициентом упругости 147,099 Н/м, преднатяжение которой составляет 0,022 м. Исследована

реакция провода на удары устройством при напряжениях заряда  $U_1=136 \text{ В} \pm 5 \%$ ,  $U_2=172 \text{ В} \pm 5 \%$ ,  $U_3=230 \text{ В} \pm 5 \%$ .



*a*



*б*

..... эксперимент (3,5 м)      - - - - численная модель (3,5 м)  
 ——— эксперимент (1,5 м)      - · - · численная модель (1,5 м)

*a* – стрела провеса 14 мм; *б* – стрела провеса 29 мм

Рисунок 60 – Сравнение экспериментальных графиков колебания провода с численной моделью

Для определения времени удара индуктора проведены вспомогательные эксперименты. Время удара определено из графика колебания тока в индукторе в процессе разряда. График тока снят при помощи трансформатора с коэффициентом трансформации  $k$  (рисунок 61). Время переходного процесса составило 250 мкс вне зависимости от уровня заряда и отталкиваемой индуктором массы, с увеличением напряжения заряда при прочих равных возрастает амплитуда силы тока, что подтверждает теоретические расчеты. Кроме этого, в

следствие увеличения отталкиваемой массы (степени прижатия частей ИС) наблюдается увеличение амплитуды силы тока.

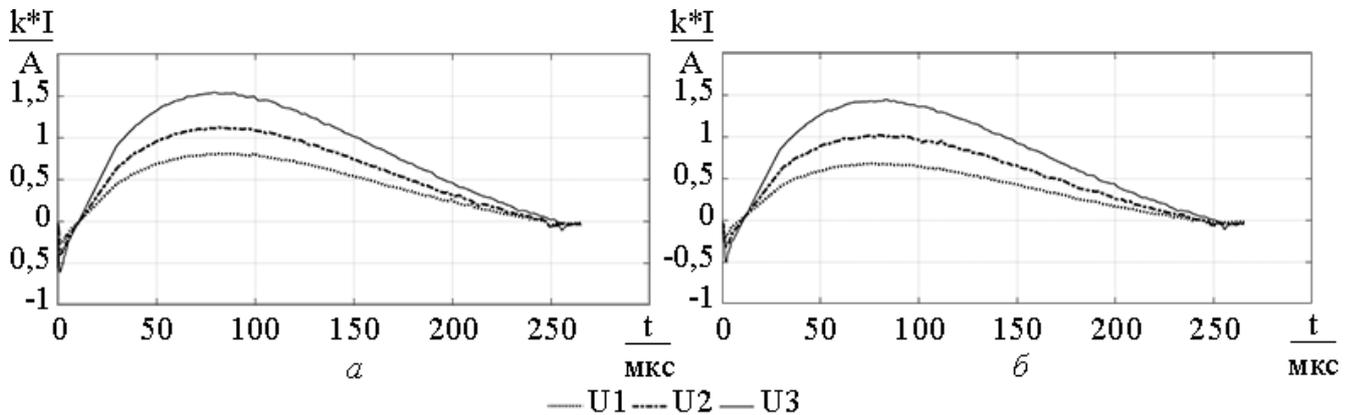


Рисунок 61 – Графики переходного процесса при различных уровнях заряда: а – крепление ИС к проводу; б – только ИС

Проведено 10 экспериментов для каждой стрелы провеса и получены осредненные значения колебаний центральной точки пролета (3,5 м) и точки пролета, отстоящей от нее на 2 м (1,5 м). Затем построена численная модель устройства (рисунок 62). Значения ЭМС для каждого из напряжений и стрел провеса определены из аналитической модели индуктора, в зависимости от присоединенной массы: при U1 максимальная сила равна 402,14 Н (стрела провеса 14 мм) и 337 Н (стрела провеса 29 мм), при U2 – 646,02 Н (стрела провеса 14 мм) и 585 Н (стрела провеса 29 мм), при U3 – 1022,61 Н (стрела провеса 14 мм). На рисунках 63, 64 приведены графики положения провода (расчет с использованием численной модели).

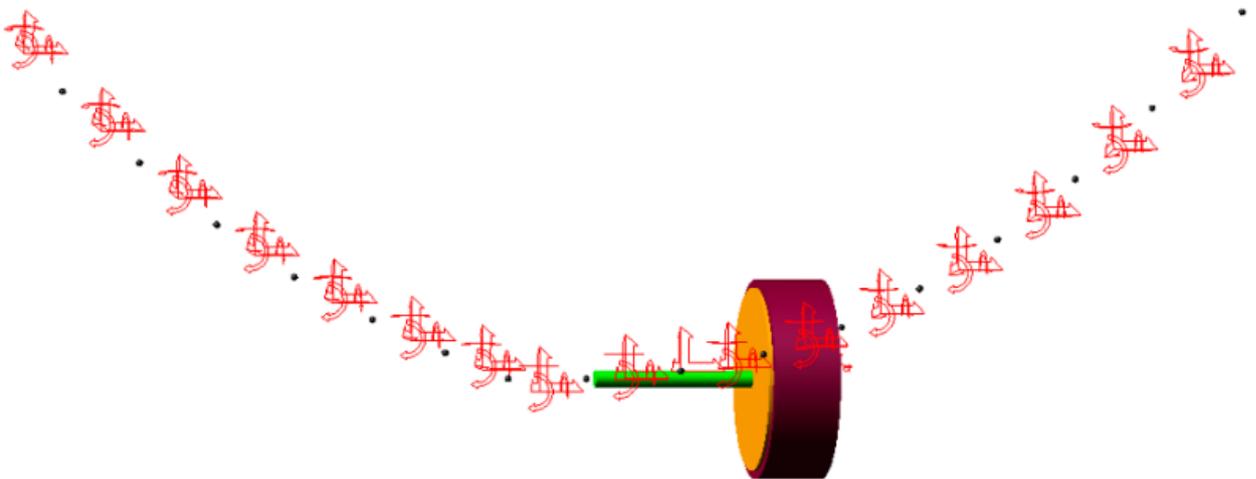


Рисунок 62 – Модель индуктора на проводе

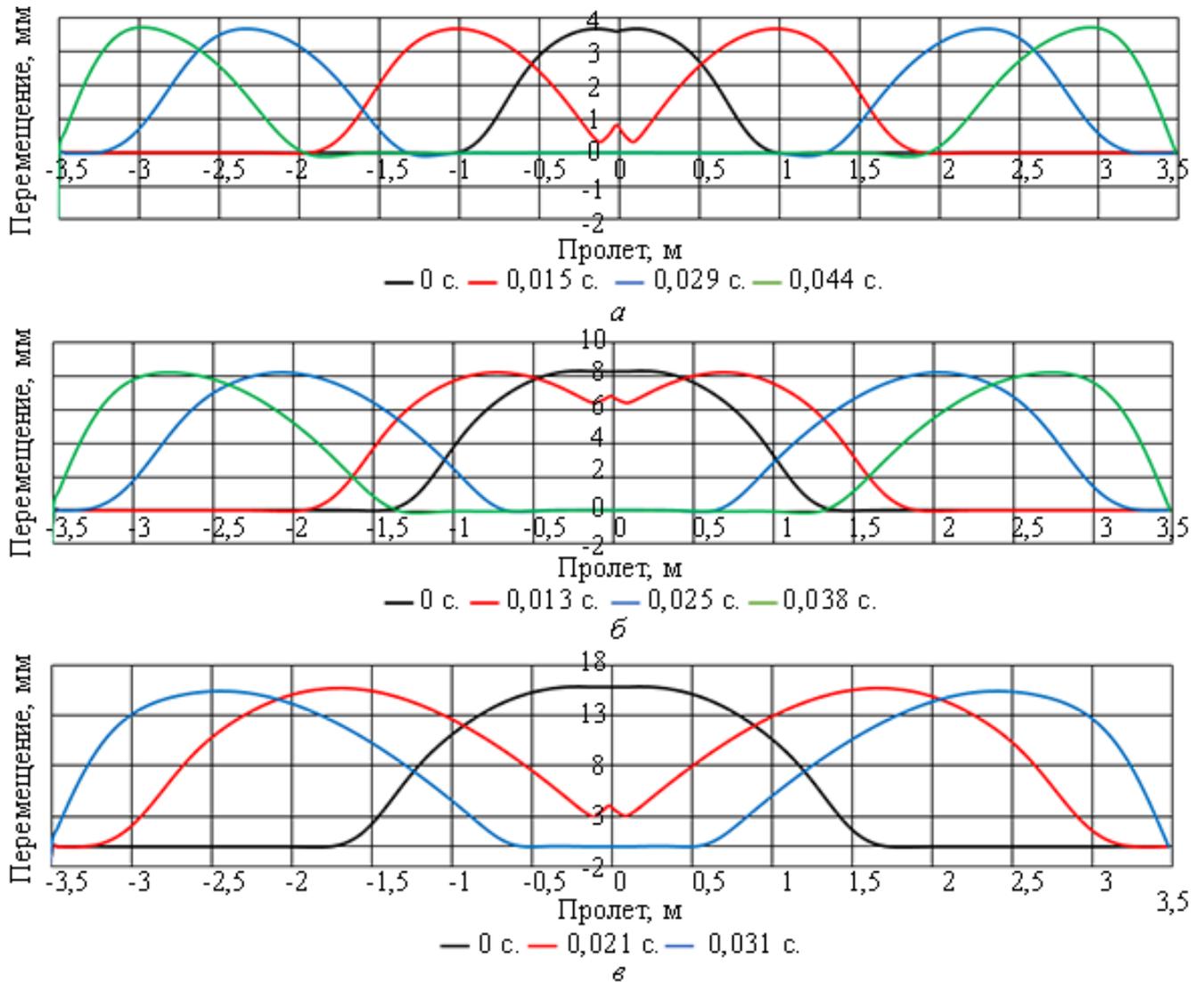


Рисунок 63 – Графики положения провода, стрела провеса 14 мм:

а – U1; б – U2; в – U3

Данные, полученные экспериментально приведены в сравнение с расчетными (рисунки 65, 66). Из графиков видно, что в месте удара быстро возникает горб (передний фронт бегущей волны), за которым следует задний фронт волны, возникающий за счет возвратного движения бойка устройства. Расхождение экспериментальных и расчетных значений, полученных в численной модели не превышает: по скорости распространения колебания – 4,4 %, по среднему значению амплитуды – 3,2 %. Расхождение экспериментальных и расчетных значений, полученных в аналитической и динамической моделях не превышает соответственно: по времени отклонения – 5 и 8 %, по амплитуде – 3 и 16 %. Таким образом, подтверждена адекватность расчетов, полученных на используемых математических моделях.

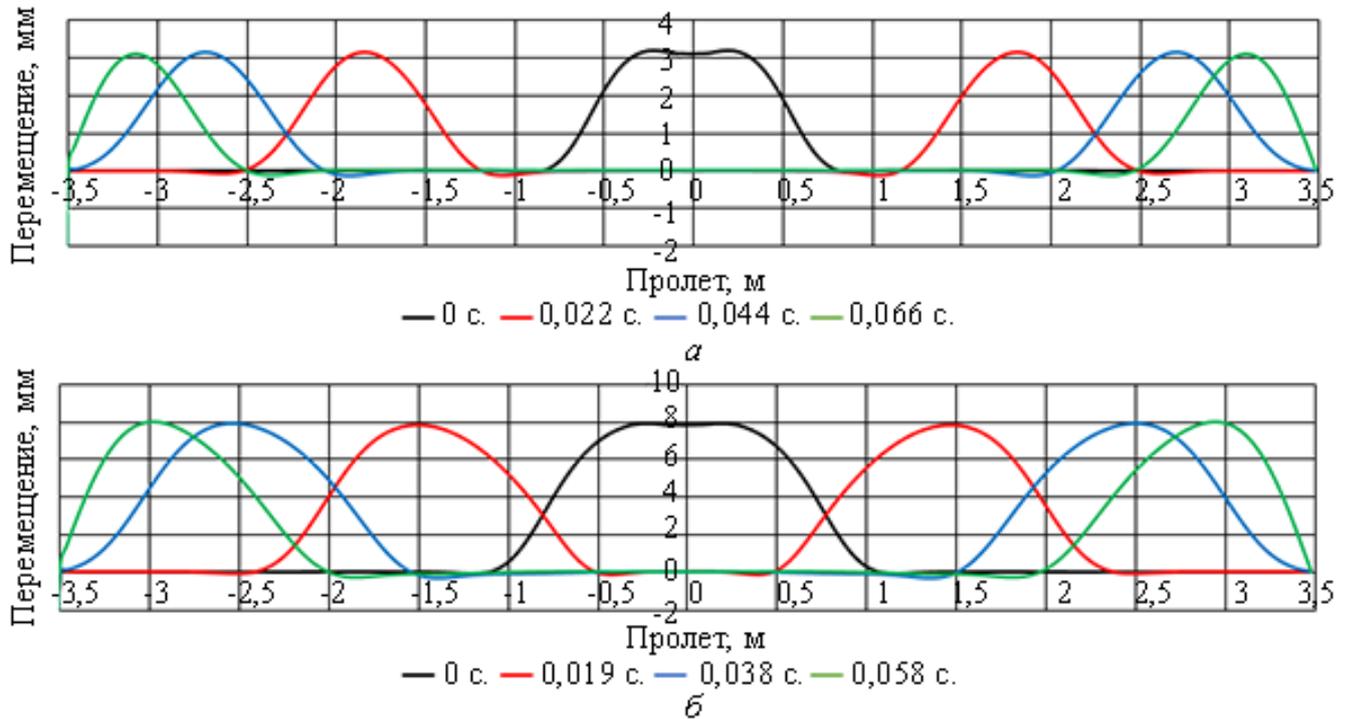
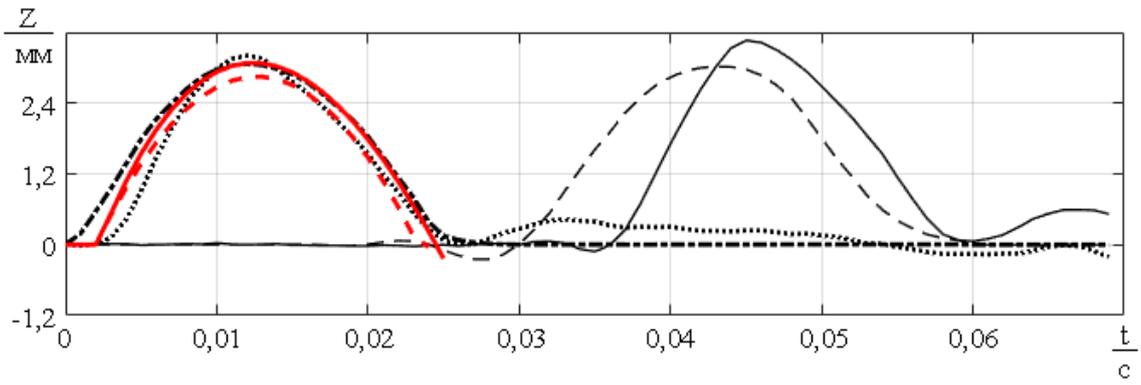


Рисунок 64 – Графики положения провода, стрела провеса 29 мм:

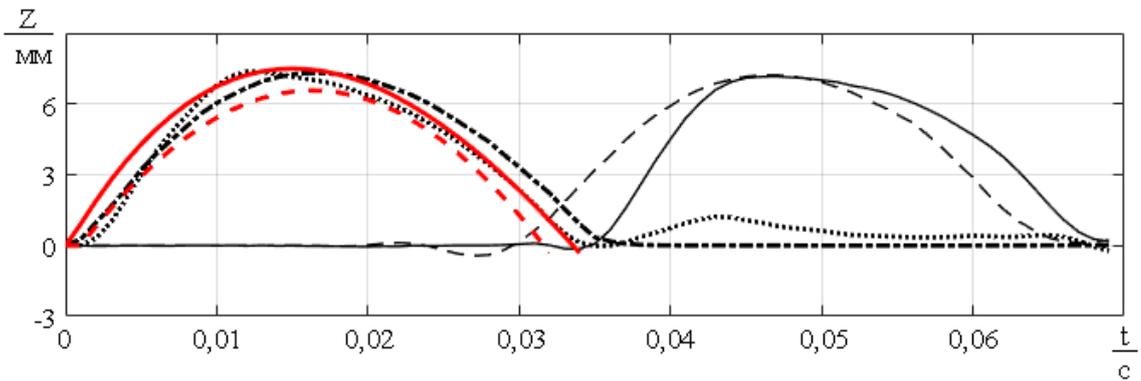
а – U1; б – U2

Следует отметить, что экспериментально подтверждены выявленные теоретически закономерности: увеличение импульса силы удара приводит к росту амплитуды бегущей волны, максимального тяжения и ускорения присоединенного тела на конце пролета. Так, ускорение присоединенного тела на конце пролета составляет: при U1 –  $15,64 \text{ м/с}^2$  (стрела провеса 14 мм) и  $8,72 \text{ м/с}^2$  (стрела провеса 29 мм), при U2 –  $26,51 \text{ м/с}^2$  (стрела провеса 14 мм) и  $16,67 \text{ м/с}^2$  (стрела провеса 29 мм), при U3 –  $47,47 \text{ м/с}^2$  (стрела провеса 14 мм).

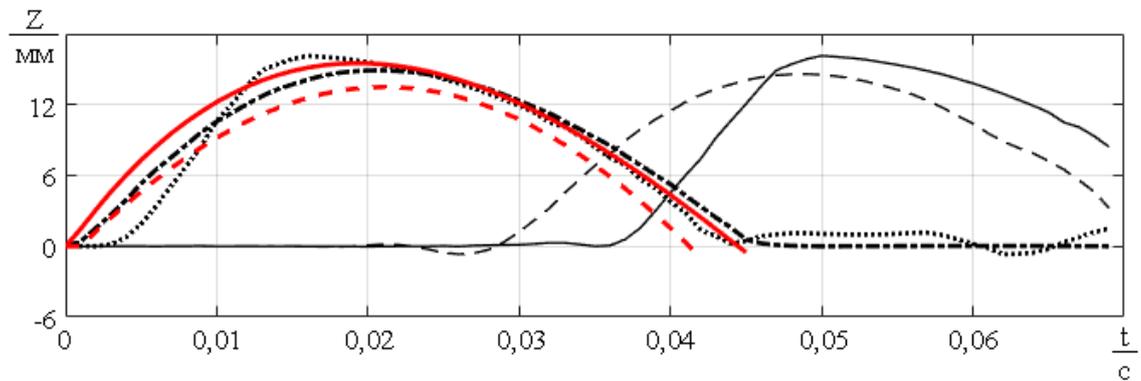
Максимальное тяжение составляет: при U1 – 51,65 Н (стрела провеса 14 мм) и 24,70 Н (стрела провеса 29 мм), при U2 – 57,32 Н (стрела провеса 14 мм) и 30,50 Н (стрела провеса 29 мм), при U3 – 70,95 Н (стрела провеса 14 мм). Также подтверждено, что при уменьшении коэффициента жесткости возвратной пружины ускорение присоединенного тела на конце пролета снижается. Кроме этого, выявлено, что с увеличением стрелы провеса ускорение присоединенной массы уменьшается при одних и тех же параметрах удара.



а



б

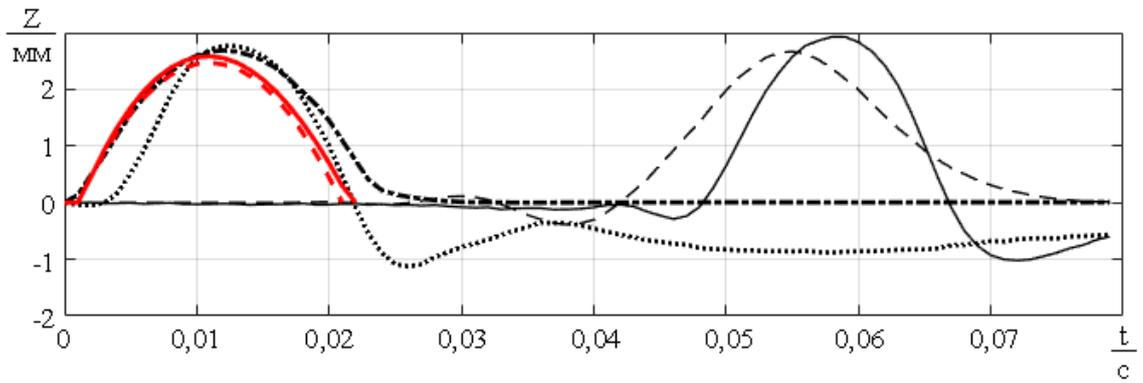


в

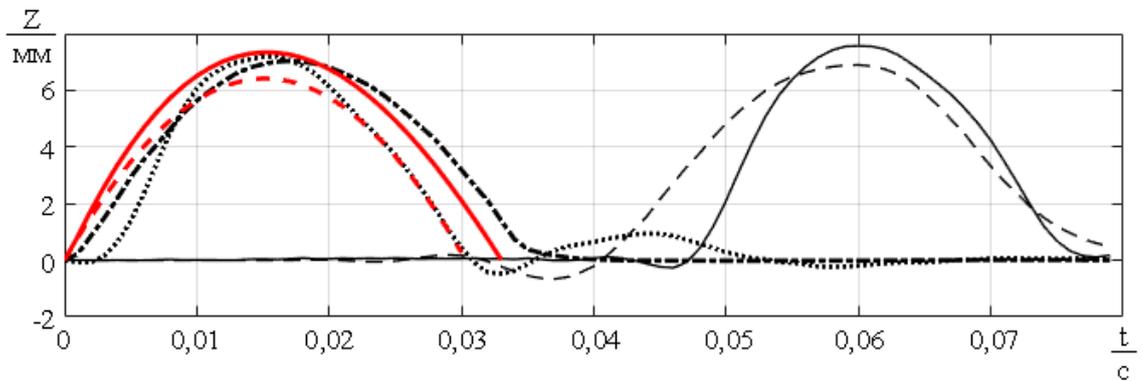
..... эксперимент (3,5 м)      - - - - численная модель (3,5 м)  
 — эксперимент (1,5 м)      - - - численная модель (1,5 м)  
 ————— аналитическая модель      - - - динамическая модель

Рисунок 65 – Сравнение экспериментальных графиков колебания провода с численной, аналитической и динамической моделями, стрела провеса 14 мм:

а – U1; б – U2; в – U3



a



б

..... эксперимент (3,5 м)      - - - - численная модель (3,5 м)  
 — эксперимент (1,5 м)      - - - численная модель (1,5 м)  
 ———— аналитическая модель      - - - динамическая модель

Рисунок 66 – Сравнение экспериментальных графиков колебания провода с численной, аналитической и динамической моделями, стрела провеса 29 мм:

a – U1; б – U2

### Вывод по главе 3

1. Разработана численная модель провода ЛЭП, представляющего собой цепочку масс, связанных упругими элементами. Для определения силы и крутящего момента в узлах провода используется модель стержня Эйлера-Бернулли в нелинейной постановке. Обоснован выбор системы компьютерного моделирования. Обоснован расчет таких параметров численной модели, как шаг дискретизации, коэффициенты жесткости и демпфирования, шаг интегрирования.

2. Построена модель капли на проводе, сформулированы условия отрыва висящей капли от поверхности в зависимости от ее размеров и направления

движения этой поверхности (вверх, вбок). Определены выражения для минимально необходимого ускорения и амплитуды движения присоединенной массы с целью ее отделения от провода. Определено, что при движении провода вверх требуется меньшее ускорение, чем при движении вбок.

3. Построена численная модель провода с присоединенными каплями и устройством. Проведена проверка адекватности и сходимости численной модели в сравнении с несколькими экспериментальными данными при статическом и динамическом расчете. Выявлены ограничения модели, связанные со сложностью моделирования критерия разрушения льда при изгибе провода.

4. Приведены результаты численных экспериментов на модели провода ЛЭП марки АС120/19 в пролете 200 м. На провод приложены нагрузки, импульс силы которых определяется сочетанием величины силы удара от 10 до 30 кН и его длительности от 25 до 25000 мкс. При ударе сбоку, в отличие от удара снизу, 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.

5. 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.

6. Получены закономерности влияния геометрических и электрических параметров устройства, обеспечивающего заданные параметры удара, на амплитуду силы тока. Значительное уменьшение амплитуды силы тока достигается при увеличении времени удара за счет изменения массогабаритных параметров ИС и емкости конденсаторной батареи.

7. Проведены эксперименты на уменьшенной модели пролета ЛЭП при помощи жестко закрепленного устройства (схемное решение крепление сбоку) и при помощи маятника (уменьшение коэффициента жесткости возвратной пружины). Расхождение результатов теоретических расчетов с экспериментальными исследованиями по среднему значению амплитуды колебаний и скорости распространения возмущения не превышает соответственно 3,2 % и 4,4 %. Экспериментально подтверждены выявленные теоретически закономерности. Выявлено, что с увеличением стрелы провеса ускорение присоединенной массы уменьшается при одних и тех же параметрах удара.

## ГЛАВА 4 ФОРМИРОВАНИЕ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ УСТРОЙСТВА ПРЕДУПРЕЖДЕНИЯ ОБРАЗОВАНИЯ ЛЬДА

### 4.1 Оптимизационная задача поиска параметров воздействия и устройства

Основная задача работы устройства заключается в предупреждении гололедообразования путем создания ударного воздействия, удаляющего капли по всей длине пролета. В то же время устройство не должно вызывать превышения допустимых нагрузок – этот показатель характеризуется максимальным тяжением и углом вибрации.

Выделим целевой функционал и на основе этого синтезируем оптимизационную задачу. На основании выявленных в предыдущей главе закономерностей известно, что массогабаритные и электрические параметры исполнительного механизма влияют на амплитуду силы тока в устройстве, время переходного процесса и силу удара. В свою очередь эти параметры влияют на амплитуду отклонения провода, ускорение присоединенной массы и тяжение. Поэтому амплитуда силы тока, импульс силы удара и масса устройства выбраны в качестве целевых показателей, как связующие электрические и механические параметры системы. Для решения оптимизационной задачи требуется минимизировать все три целевых показателя при условии достижения необходимого значения амплитуды отклонения и ускорения присоединенной массы. Эти условия являются стратегически важными для достижения целевого воздействия, к тому же они являются конкурентными (например, рост ускорения наблюдается при увеличении импульса силы удара). Оптимальные механические показатели воздействия не обязательно достигаются устройством с наилучшими показателями (например, при наименьшей массе). При этом важность каждой из целей не поддается весовой оценке. Поэтому необходимо нахождение подмножества Парето-оптимальных решений. В отличие от методов, использующих свертку в пространстве критериев, построение множества равноценных альтернатив, называемого множеством Парето, основано на сужении этого множества путем исключения заведомо плохих, когда число

альтернатив велико и альтернативы имеют противоречивые оценки по разным критериям.

Введем следующие обозначения:

- управляющие параметры: сила удара  $F_{уд}$  (Н), время удара  $t_{уд}$  (с);
- ограничения: погонный вес провода  $p$  (кг/м), площадь поперечного сечения провода  $S_0$  (мм<sup>2</sup>), плотность  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), диаметр провода  $D_{пр}$  (мм), модуль Юнга  $E$  (ГПа), прочность на растяжение  $F_u$  (кН), длина пролета  $L$  (м), стрела провеса  $f$  (м), тяжесть  $N$  (Н), радиус капли  $r$  (мм), сила поверхностного натяжения при заданной температуре  $\sigma$  (Н/мм);

- ресурсы оптимизации – это возможность выбора значений некоторых параметров, дающих определенные степени свободы: геометрические и электрические параметры исполнительного устройства, определяющие параметры удара (внешний и внутренний диаметр индуктора  $D$  и  $d$  соответственно, ширина шины и изоляционного слоя индуктора  $\Delta_s$  и  $\Delta_i$  соответственно, высота шины и бойка  $h_s$  и  $h_b$  соответственно, емкость конденсаторной батареи  $C$ , напряжение заряда  $U_C$ ); масса устройства, являющаяся составным параметром, включающим в себя массу бойка, индуктора, накопителей заряда и корпуса  $M = m_{бой} + m_{инд} + m_C + m_{корп}$ ; коэффициент жесткости возвратной пружины  $k$ , преднагрузка возвратной пружины  $F_{пред} = k\Delta z$ ; ширина контакта устройства с проводом  $2\delta$ .

Задачу поиска оптимальных параметров воздействия и устройства можно сформулировать следующим образом: необходимо вычислить оптимальные значения набора управляющих параметров  $\{F_{уд}, t_{уд}\}$ , обеспечивающих минимальное значение целевых показателей  $\{I_{уд}, I, M\}$  (65)

$$\begin{aligned} I_{уд} &\rightarrow \min, \\ I &\rightarrow \min, \end{aligned} \quad (65)$$

$$M \rightarrow \min,$$

при выполнении ограничений (66)

$$\begin{cases} a_{\min} \geq \frac{2\pi r \sigma}{m_{\text{кап}}}, \\ A_{\min} \geq \frac{1}{2}r. \end{cases} \quad (66)$$

Построение множества Парето является одним из этапов технологии автоматизированного проектирования устройства для предупреждения образования гололеда.

#### 4.2 Методика проектирования устройства предупреждения образования льда

Рассмотрим этапы методики проектирования устройства предупреждения образования льда на основе ЛИИЭП [144] (рисунок 67).

1. Этап сбора входных параметров.

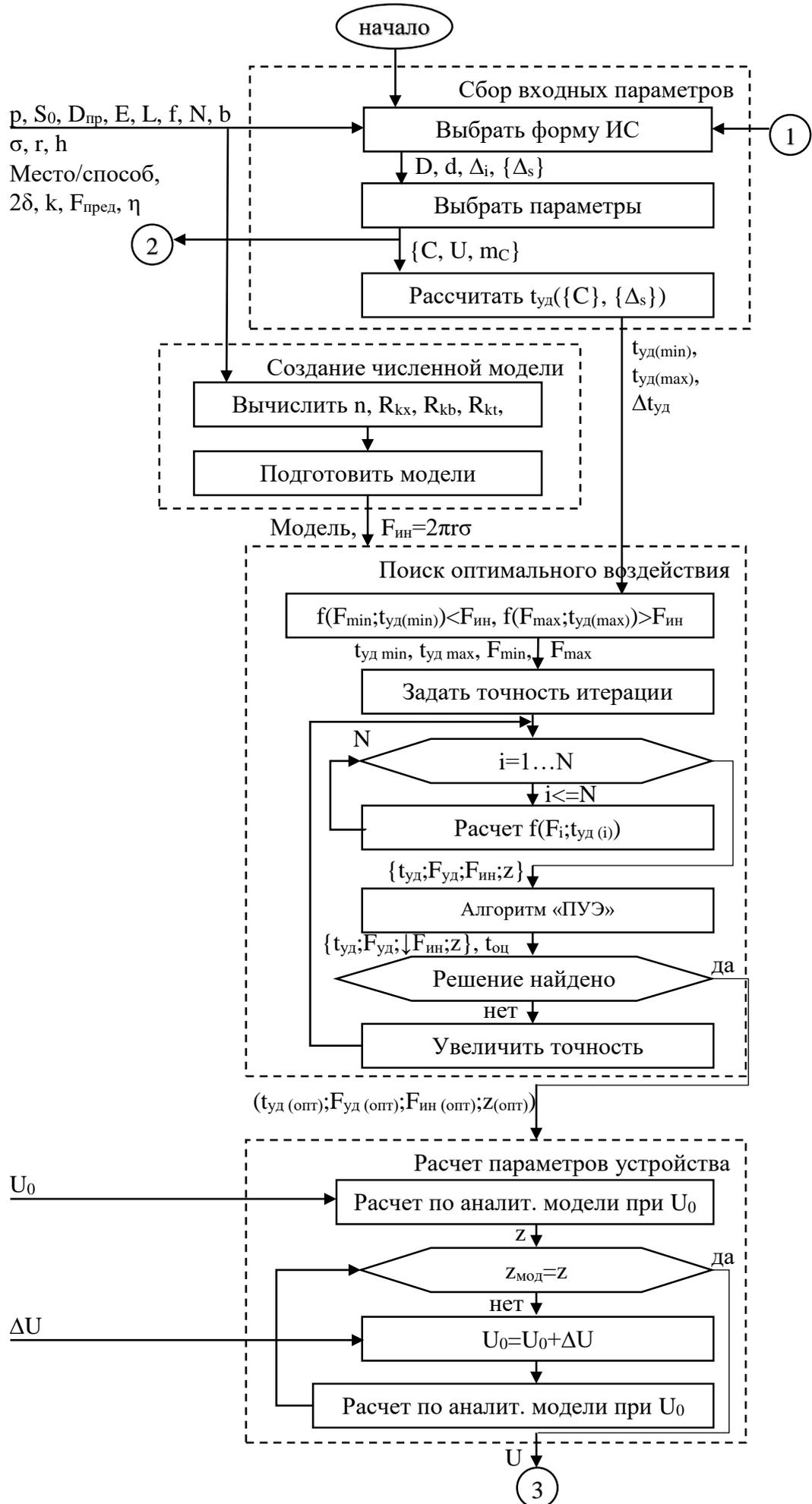
*Параметры провода:* погонный вес  $p$  (кг/м), площадь поперечного сечения  $S_0$  (мм<sup>2</sup>) и диаметр провода  $D_{\text{пр}}$  (мм), модуль Юнга  $E$  (ГПа). Если известна марка провода, то эти параметры можно получить из справочной литературы. Если марка провода неизвестна, то следует измерить погонный вес провода и его диаметр, а также рассчитать площадь поперечного сечения как сумму поперечных сечений проволок по формуле (67)

$$S_0 = \pi \sum_{i=1}^n r_i^2, \quad (67)$$

где  $n$  – количество проволок в проводе,  $r_i$  – радиус  $i$ -ой проволоки в проводе. Измерить модуль Юнга можно по одной из известных методик, например, [145]).

*Параметры пролета:* длина пролета  $L$  (м), стрела провеса  $f$  (м), тяжеие (распор)  $N$  (Н) при нагрузке от собственного веса. Поскольку эти параметры связаны известной зависимостью, то задав одну, несложно получить другую (68)

$$N = \frac{pgL^2}{8f}. \quad (68)$$



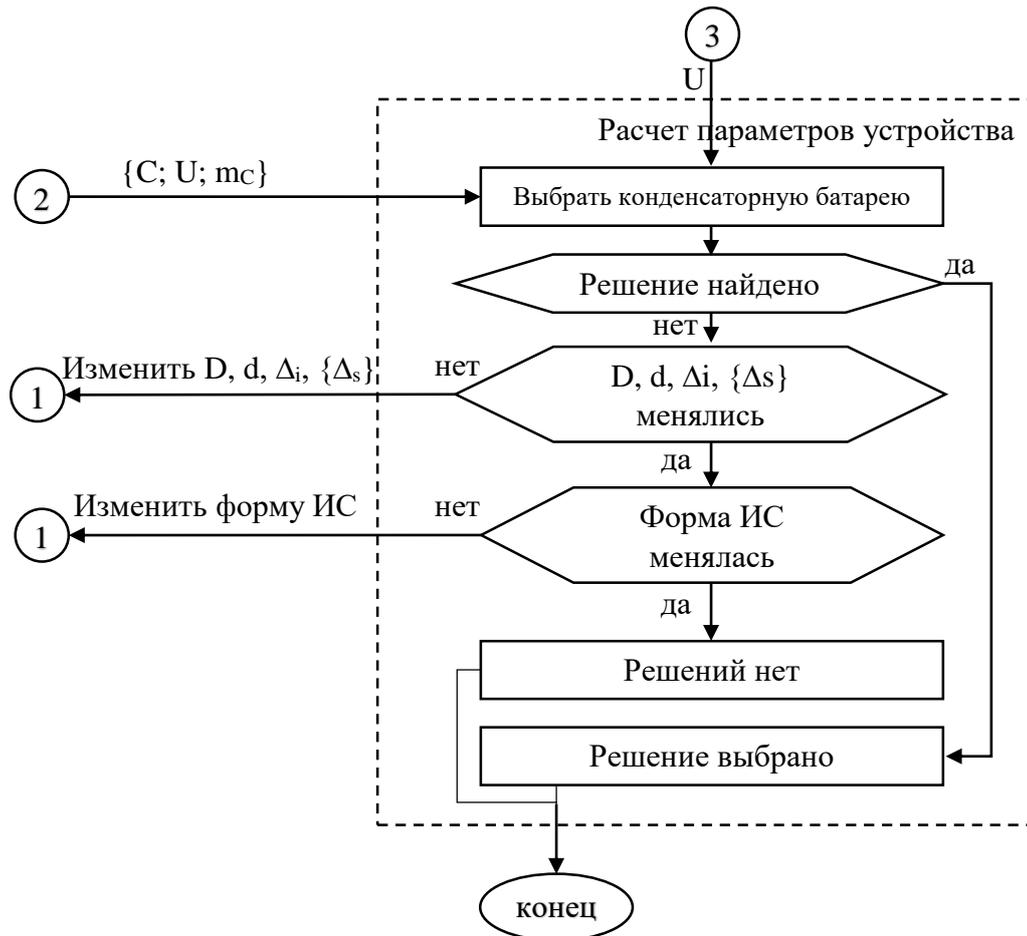


Рисунок 67 – Алгоритм методики проектирования устройства для предупреждения гололедообразования на проводах ЛЭП

Из волнового уравнения для весомой, линейно упругой нити, не сопротивляющейся изгибу следует вычислить фазовую скорость бегущей волны  $b$  (3).

*Параметры модели капли:* необходимо задать радиус  $r$  и высоту  $h$  капли, силу поверхностного натяжения  $\sigma$  в зависимости от температуры.

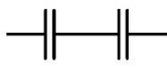
*Параметры устройства:* необходимо задать место размещения устройства, способ его закрепления, ширину контакта с проводом  $2\delta$ , коэффициент жесткости возвратной пружины  $k$ , преднагрузку возвратной пружины  $F_{\text{пред}}$ , коэффициент трения ИС о корпус устройства  $\eta$ .

Начать проектирование устройства следует с выбора формы ИС, затем для выбранной формы определить ее основные параметры. Например, для плоской

ИС – задать внешний и внутренний диаметр индуктора и бойка  $D$  и  $d$ , толщину изоляции спирали индуктора  $\Delta_i$  и диапазон толщин спирали индуктора  $\{\Delta_s\}$ .

Затем следует задать наборы возможных параметров конденсаторной батареи  $\{C, m_c, U\}$ . Для этого рекомендуется составить таблицу (таблица 8) на основе анализа параметров пусковых конденсаторов, представленных в продаже.

Таблица 8 – Сравнительная таблица параметров конденсаторных батарей

Параметры конденсаторной батареи			Параметры конденсатора при вариантах подключения		
Напряжение, В	Емкость, мкФ	Масса, кг			
Значение	Значение	Значение	+/- (наличие конденсатора с выбранными параметрами)	+/- (наличие конденсаторов, обеспечивающих их при последовательном подключении выбранные параметры)	+/- (наличие конденсаторов, обеспечивающих их при параллельном подключении выбранные параметры)
				Емкость одного конденсатора	Емкость одного конденсатора
				Суммарное напряжение заряда	Суммарное напряжение заряда
				Масса одного конденсатора	Масса одного конденсатора

Рекомендуется отдать предпочтение высоковольтным импульсным пусковым конденсаторам в связи с особенностями разряда конденсатора на ИС, такими как большая амплитуда импульса разрядного тока и высокая скорость нарастания мгновенного значения тока (быстрый вклад энергии, запасенной в конденсаторе, в

нагрузку), требования к уровню заряда при минимальной собственной индуктивности и активном сопротивлении.

Для каждого набора параметров конденсаторной батареи следует вычислить зависимость  $t_{\text{уд}}(C, \Delta_s)$  по формуле (31). Полученные значения должны удовлетворять условиям  $t_{\text{уд}(\min)} \leq 250 \text{ мкс}$ ,  $t_{\text{уд}(\max)} \geq 250 \text{ мкс}$  либо другим, в зависимости от геометрии индуктора. Шаг дискретизации  $\Delta t_{\text{уд}}$  определяется в зависимости от возможного набора  $\{\Delta_s\}$ . Для простоты восприятия рекомендуется построить семейство кривых для набора емкостей.

## 2. Этап создания численной модели.

*Определение параметров модели провода:* шага дискретизации (количества элементов на метр), коэффициентов жесткости в осевом, изгибном и крутильном направлениях, коэффициента демпфирования, шага интегрирования. Условия определения параметров описаны в п. 3.1.1.

*Создание модели* пары проводов, капель и устройства, создание датчиков, целевой функции и скрипта симуляции по алгоритму, описанному в п. 3.2.

## 3. Этап поиска оптимального воздействия

заключается в определении силы и времени удара. Этап носит итеративный характер. Нулевая итерация заключается в определении граничных сил удара  $F_{\min}, F_{\max}$  для граничных значений времени удара  $t_{\text{уд}(\min)}, t_{\text{уд}(\max)}$ , полученных на втором этапе. За минимальную силу удара следует принять то значение, при котором ограничения (66) не выполняются, за максимальное – при котором указанные ограничения выполняются. Цель проведения дальнейших итераций – поиск оптимальных значений параметров удара внутри обозначенной области путем уменьшения шага дискретизации.

Решение о точности расчетов  $i$ -ой итерации является результатом экспертной оценки. Рекомендуемым значением для времени удара является точность, кратная  $\Delta t_{\text{уд}}$  и на первой итерации не превышающая 4 точек, для силы удара – также не более 4 точек. Количество планируемых численных экспериментов  $N$  определяется по формуле (69)

$$N = \prod_{i=1}^k S_i, \quad (69)$$

где  $S_i$  – дискретизация  $i$ -го параметра.

В результате численных экспериментов, проведенных на  $i$ -ой итерации в множество Парето может попасть меньшая доля из  $N$  расчетных точек, поэтому для уточнения фронта Парето и точки оптимума потребуется повторить итерацию расчета.

Для упрощения задачи анализа значений, полученных на очередной итерации, а также оценки временных затрат на следующую итерацию и проведения наиболее значимых экспериментов, разработан алгоритм «Планирование уточняющего эксперимента» [146]. Алгоритм рассчитан на то, что первичная дискретизация области параметров будет равномерной.

На основании численно полученных данных о силе инерции, сообщенной капле, происходит вычисление количества численных экспериментов и их параметров, которые необходимо выполнить на следующем шаге, чтобы уточнить множество Парето-оптимальных решений. Алгоритм рассчитан на то, что точность расчетов на следующей итерации будет увеличена вдвое – это обеспечит достаточное уточнение информации за приемлемое время численных экспериментов (рисунок 68).

В результате алгоритм формирует таблицу (рисунок 69) управляющих параметров ( $\{F_{уд}, t_{уд}\}$ ), сортированную по возрастанию импульса силы ( $\{I_{уд}\}$ ). При этом в таблицу включены как строки проведенных экспериментов ( $\{I_{уд}\}$  имеет соответствующее значение), так и строки планируемых экспериментов ( $\{I_{уд}\} = -1$ ). В таблицу не входят строки, для которых сила инерции не превышает порогового значения. Поле «Время на эксперимент» вычисляется из расчета 15 мин. на один эксперимент.

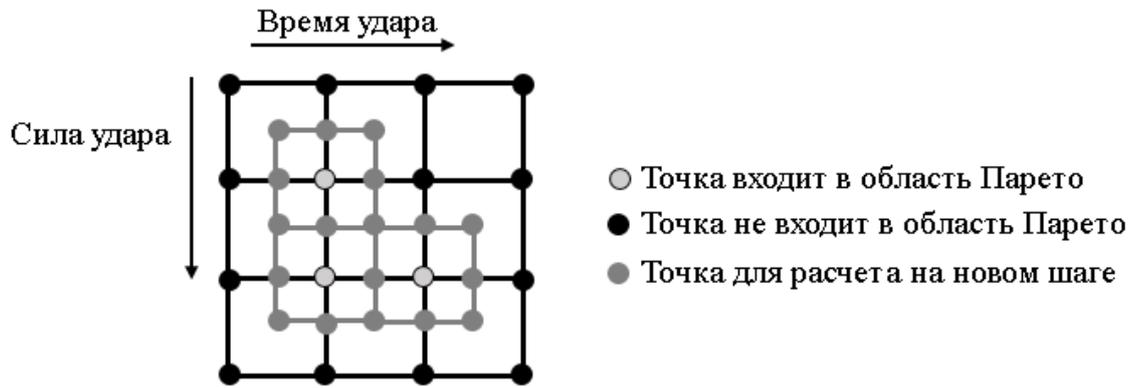


Рисунок 68 – Область вычисления параметров удара

Form1

**Предыдущий эксперимент**

Шаг дискретизации для S1 (F, kN)   Шаг дискретизации для S2 (t, mks)   Сформировать матрицу S1xS2

Введите значения S1 (F, kN):

	F, kN
1	1
2	2
3	3
4	4

Введите значения S2 (t, mks):

	t, mks
1	200
2	220
3	240
4	260

	200	220	240	260
1	12	24	26	32
2	45	15	45	62
3	25	24	74	12
4	36	85	26	52

Парето

**Планируемый эксперимент** Время на эксперимент 270 мин. Заготовка расширенной матрицы S1xS2a (для планируемого эксперимента)

	F, kN	t, mks	Fin, N	I, kN*mks
1	1.5	250	-1	375
2	1.5	260	-1	390
3	2	250	-1	500
4	2	260	62	520
5	2.5	230	-1	575
6	2.5	240	-1	600
7	2.5	250	-1	625

	210	220	230	240	250	260
1.5	0	0	0	0	0	0
2	0	15	0	45	0	62
2.5	0	0	0	0	0	0
3	0	24	0	74	0	12
3.5	0	0	0	0	0	0
4	0	85	0	26	0	52

Рисунок 69 – Результат выполнения алгоритма «Планирование уточняющего эксперимента»

Задача поиска оптимального воздействия может считаться выполненной с достаточной степенью точности, когда получены значения амплитуды  $Z$  и результирующей силы инерции, удовлетворяющие ограничениям при достигнутом целевом показателе, минимум для двух значений силы удара при фиксированном значении времени удара и, аналогично, минимум для двух значений времени удара при фиксированном значении силы удара. Таким

образом, исключается возможность остановки поиска оптимального решения, когда множество Парето состоит только из одной точки.

4. Этап расчета параметров устройства (электрических и массогабаритных). Расчет выполняется путем решения системы уравнений аналитической модели электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП устройства для предупреждения гололедообразования.

Входными параметрами для системы являются данные, полученные на предыдущих этапах. Следует получить соответствие координаты перемещения бойка  $z$  с перемещением бойка, вычисленным на предыдущем этапе. Отсюда следуют значения электрических и массогабаритных параметров устройства.

Полученное напряжение заряда необходимо сопоставить с таблицей параметров конденсаторной батареи (таблица 8) и путем экспертной оценки выбрать предпочтительный вариант по наименьшему току и массе. Если такой вариант не найден, то повторить этапы 3-5 для других параметров конденсаторной батареи; если этот шаг уже выполнялся, то на 1 этапе переопределить ширину массогабаритные параметры ИС; если этот шаг уже выполнялся, то на 1 этапе переопределить форму ИС.

Окончательный перечень параметров устройства включает в себя: емкость и напряжение заряда конденсаторной батареи, массогабаритные и электрические параметры ИС (таблица 9).

Таблица 9 – Параметры устройства

Параметры	
Внешний диаметр индуктора и бойка, м	Паразитное активное сопротивление, Ом
Внутренний диаметр индуктора и бойка, м	Емкость накопительного конденсатора, Ф
Ширина шины индуктора, м	Напряжение, до которого заряжается конденсатор, В
Высота шины индуктора, м	Суммарная отталкиваемая масса со стороны индуктора и бойка, кг

Параметры	
Высота бойка, м	Сила удара, Н
Ширина изоляционного слоя, м	Время удара, с
Количество витков спирали индуктора, шт.	Отклонение бойка, м
Паразитная индуктивность, Гн	Сила инерции капли на конце пролета, Н

### 4.3 Расчет экспериментальной установки

Для экспериментальной проверки адекватности предложенной методики выполнено проектирование экспериментальной установки для модели ЛЭП в уменьшенном масштабе [147-149]. Масштабирование ЛЭП выполнено с учетом критериев подобия.

#### 4.3.1 Определение критериев подобия для масштабирования

Задачу масштабирования можно сформулировать как требование  $n$ -кратного уменьшения реального объекта при сохранении определенных конструктивных особенностей и параметров. Величину  $n$  будем называть коэффициентом изменения масштаба. Величины, характеризующие реальный объект будем обозначать штрихом, а величины, характеризующие модель – двумя штрихами.

Провод характеризуется геометрическими параметрами: длиной  $L$  (м), площадью поперечного сечения  $S_0$  (мм<sup>2</sup>), объемом  $V$  (м<sup>3</sup>); физическими величинами: погонным весом провода  $p$  (кг/м), плотностью  $\rho$  (кг/м<sup>3</sup>), модулем Юнга  $E$  (Н/м<sup>2</sup>). Механический расчет пролета ЛЭП включает в себя определение тяжения  $N$  (Н), абсолютного значения стрелы провеса  $f$  (м). В некоторых источниках стрела провеса рассчитывается как отношение абсолютного значения стрелы провеса к длине пролета  $f\%$  (%). Ударное воздействие на провод определяется величиной внешней сосредоточенной нагрузки  $F_{уд}$  (Н) и временем

ее действия  $t_{уд}$  (с). С учетом того, что приведенные параметры значительно влияют на колебания провода при поперечном ударе, эти величины являются определяющими данное явление. Следовательно, соблюдение их подобия при масштабировании обеспечивает выполнение условия подобия [150]. Величины объема, плотности, относительной стрелы провеса являются независимыми.

Для определения размеров и параметров модели реального пролета ЛЭП в  $n$ -кратном масштабе, составим уравнения изменения масштаба (70)

$$\frac{L'}{L''} = n^{P_L}, \frac{S_0'}{S_0''} = n^{P_{S_0}}, \frac{V'}{V''} = n^{P_V}, \frac{p'}{p''} = n^{P_p}, \frac{\rho'}{\rho''} = n^{P_\rho}, \frac{N'}{N''} = n^{P_N},$$

$$\frac{f'}{f''} = n^{P_f}, \frac{E'}{E''} = n^{P_E}, \frac{v'}{v''} = n^{P_v}, \frac{F_{уд}'}{F_{уд}''} = n^{P_{F_{уд}}}. \quad (70)$$

Коэффициент изменения масштаба представлен в виде степенной функции, где  $P_i$  является показателем изменения масштаба. Задача сводится к определению всех этих показателей.

В качестве единицы масштаба геометрических размеров провода примем его объем, то есть показатель изменения масштаба  $P_V = 1$ . Из условий геометрического подобия следует, что отношение объемов равно отношению кубов сходных линейных размеров реального объекта и модели (71)

$$P_L = \frac{1}{3}, P_{S_0} = \frac{2}{3}. \quad (71)$$

Поскольку объем одного метра провода равен площади его поперечного сечения  $V_{(1)} = S_0 L_{(1)} = S_0$ , то погонный вес провода  $p = V_{(1)} \rho = S_0 \rho$ . Тогда из уравнений масштаба следует (72)

$$p'' n^{P_p} = S_0'' n^{P_{S_0}} \rho'' n^{P_\rho} = p'' n^{P_{S_0}} n^{P_\rho}. \quad (72)$$

Откуда, учитывая, что  $P_{S_0} = \frac{2}{3}$ , получаем соотношение (73)

$$P_p = \frac{2}{3} + P_\rho. \quad (73)$$

Получим систему уравнений для вычисления показателей изменения масштаба тяжения и стрелы провеса модельного пролета. Из известных уравнений (74)

$$\sigma = \frac{N}{S_0}, \gamma = \frac{pg}{S_0}, f = \frac{\gamma L^2}{8\sigma}, p = S_0 \rho \quad (74)$$

Получим выражение (75)

$$N = \frac{gpL^2}{8f} \quad (75)$$

Принимая  $\frac{N}{gpL} = const$ , имеем (76)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N'}{gp'L'} = \frac{N''}{gp''L''}, \\ \frac{gp'L'^2}{8f'p'L'} = \frac{gp''L''^2}{8f''p''L''}. \end{array} \right. \quad (76)$$

Подставляя в приведенную систему величины, характеризующие модель из уравнений масштаба, имеем (77)

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{N''n^{P_N}}{L''n^{P_L}p''n^{P_p}} = \frac{N''}{L''p''}, \\ \frac{L''n^{P_L}}{f''n^{P_f}} = \frac{L''}{f''}. \end{array} \right. \quad (77)$$

После упрощения (78)

$$\left\{ \begin{array}{l} n^{P_N - P_L - P_p} = 1, \\ n^{P_L - P_f} = 1. \end{array} \right. \quad (78)$$

Следовательно, (79)

$$P_N = 1 + P_p, P_f = \frac{1}{3}. \quad (79)$$

При изучении упругих деформаций конструкции под воздействием внешних сил, основными критериями подобия являются модуль Юнга и коэффициент Пуассона для материала конструкции. Критерий подобия заключается в равенстве для объекта и модели следующих выражений [150] (80)

$$\left\{ \begin{array}{l} v' = v'', \\ \frac{E'}{\rho' g L'} = \frac{E''}{\rho'' g L''}, \\ \frac{F_{уд}'}{E' L'^2} = \frac{F_{уд}''}{E'' L''^2}. \end{array} \right. \quad (80)$$

Откуда следуют выражения для показателей изменения масштаба (81)

$$P_E = \frac{1}{3} + P_\rho, P_{F_{уд}} = \frac{2}{3} + P_\rho. \quad (81)$$

Таким образом, в модели в  $n$  раз меньшей, чем объект моделирования, деформации (соответствующие перемещения) будут в  $n$  раз меньше.

Вычислены параметры модельного пролета для объекта моделирования провод АС120/19 с коэффициентом изменения масштаба  $n=850$ . Для модельного пролета выбран стальной витой тросик, дающий удовлетворительное согласие со значениями расчетного масштабирования. В таблице 10 представлены параметры исходного, расчетного масштабированного и реализованного масштабированного пролетов, а также соответствующие показатели изменения масштаба.

Таблица 10 – Параметры исходного, расчетного и реализованного пролетов

Параметр	Исходный пролет	Масштабированный пролет		Показатель изменения масштаба
		расчет	практика	
Объем, м <sup>2</sup>	886,795*10 <sup>-5</sup>	1,043*10 <sup>-5</sup>	1,067*10 <sup>-5</sup>	1
Длина пролета, м	65	6,86	7	1/3
Площадь поперечного сечения провода, мм <sup>2</sup>	136,43	1,52	1,52	2/3
Диаметр провода, мм	15,2	1,60	1,39	1/3
Плотность, кг/м	0,471	0,016	0,012	0,502
Стрела провеса, мм	134,85;277,96	14,24;29,34	14,33;29,33	1/3
Тяжение, Н	18077;8770	65;31	49;23,95	5/6
Модуль Юнга, ГПа	82,5	26,5	189,9	0,168
Коэффициент Пуассона	—	—	—	1
Сила удара, Н	20000	678,3	646,02;585	1/2

Длина пролета объекта моделирования выбрана произвольно как одна из возможных для ЛЭП, откуда получена площадь поперечного сечения. Кроме этого выбран показатель изменения масштаба плотности, откуда получен погонный вес, стрела провеса и тяжение модельного пролета.

Вычислен модуль Юнга для масштабированного пролета, который должен быть меньше, чем у моделируемого провода. Однако, подобрать тросик, соответствующий одновременно всем критериям подобия, не удалось. Измеренный модуль Юнга для выбранного модельного образца больше, чем у моделируемого провода и составляет 189,880 ГПа с точностью 32,44 ГПа (17 %). Для измерения модуля Юнга было проведено 10 измерений относительного удлинения провода при трех различных значениях растягивающей силы. Измерение длин выполнялось при помощи лазерной линейки. Модуль Юнга вычислялся по формуле (82)

$$E = \frac{FL}{S\Delta L}, \quad (82)$$

где  $F = F_2 - F_1$  – разница между приложенными силами натяжения провода, каждая из которых вычислена в зависимости от стрелы провеса по формуле

$$F_i = \frac{\rho g l^2}{8f_i}, \quad L - \text{расстояние между опорами, } \Delta L = L + \frac{3f^2}{2L} - \text{удлинение провода.}$$

Таким образом, изгибная жесткость модельного образца и объекта моделирования значительно разнятся, то есть реакция провода на удар будет отличаться, тем не менее, это не мешает использовать построенные модели и методику.

#### 4.3.2 Проектирование экспериментальной установки

По причине того, что мы рассматриваем разработку экспериментальной установки для модели ЛЭП в уменьшенном масштабе, масса устройства должна быть уменьшена пропорционально. Однако, устройство нельзя масштабировать до размеров, когда его вес будет значительно меньше веса модельного пролета без ущерба для параметров удара. В связи этим принято решение о закреплении

устройства на земле, что минимизирует весовую нагрузку на провод. Конструктивная схема устройства в такой реализации представлена на рисунке 70.

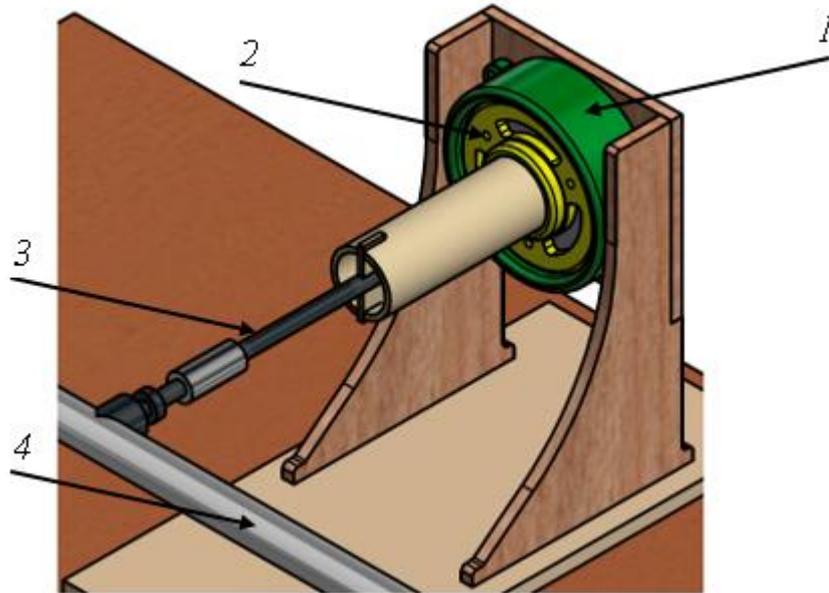


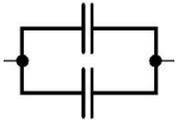
Рисунок 70 – Конструктивная схема устройства для модели ЛЭП: 1 – индуктор в корпусе, 2 – боек в корпусе, 3 – штанга, 4 – провод

Боек экспериментальной установки с одной стороны прижат к индуктору возвратной пружиной, с другой – жестко соединен с проводом посредством штанги. В отличие полномасштабного варианта, индуктор в корпусе, конденсаторная батарея и другие функциональные блоки устройства зафиксированы на неподвижной платформе. Такое изменение конструкции не меняет характер воздействия на провод: боек с прикрепленным проводом отталкивается от неподвижного индуктора также, как если бы он отталкивался от подвижного индуктора, закрепленного на второй провод пары.

В соответствии с методикой проведен анализ параметров пусковых конденсаторов, представленных в продаже, в результате чего определен набор возможных конденсаторных батарей (таблица 11). Выбрана плоская форма ИС, для которой с использованием уравнения (31) построено семейство кривых (рисунок 71) при выбранных константах  $D = 0,055$  м,  $d = 0,002$  м,  $\Delta_i = 0,00001$  м,  $\Delta_s = 0,0005...0,0014$  м. Таким образом, в зависимости от набора возможных

емкостей и толщины провода спирали индуктора определен возможный диапазон времен удара от 200 до 400 мкс с шагом дискретизации 15 мкс.

Таблица 11 – Сравнительная таблица параметров конденсаторных батарей

Параметры конденсаторной батареи			Параметры конденсатора при вариантах подключения		
Емкость, мкФ	Напряжение, В	Масса, кг			
400	300	0,168	+ (один конденсатор 400 мкФ, 300 В, 0,168 кг)	–	–
400	300	0,200	–	–	+ (два конденсатора 200 мкФ, 300 В, 0,1 кг)
400	600	0,600	–	+ (два конденсатора 800 мкФ, 300 В, 0,3 кг)	–
600	300	0,240	+ (один конденсатор 300 мкФ, 600 В, 0,240 кг)	–	–
600	300	0,280	–	–	+ (два конденсатора 300 мкФ, 300 В, 0,140 кг)
600	900	0,680	–	+ (два конденсатора 1200 мкФ, 450 В, 0,340 кг)	–
900	300	0,360	–	–	+ (два конденсатора 450 мкФ, 300 В, 0,180 кг)

Затем построена модель пролета в MSC Adams. Коэффициенты жесткости: осевой  $R_{kx}=1$ , изгибной  $R_{kb}=0,1$ , крутильной  $R_{kt}=0,1$ . Коэффициент демпфирования 0,001, собственная частота первой гармоники, рассчитанная по формуле (4), составляет: при тяжении 49 Н – 4,56 Гц, при тяжении 23,95 Н – 3,19 Гц, что совпадает с собственной частотой модели провода 4,72 и 3,25 Гц соответственно. Выбраны параметры удаляемой капли воды: коэффициент поверхностного натяжения воды  $75,62 \cdot 10^{-3}$  Н/м при  $0^\circ\text{C}$  [141], радиус и высота капли 1 мм. Минимально необходимое ускорение для отрыва капли при ударе сбоку, вычисленное по формуле (58), составляет  $227 \text{ м/с}^2$ .

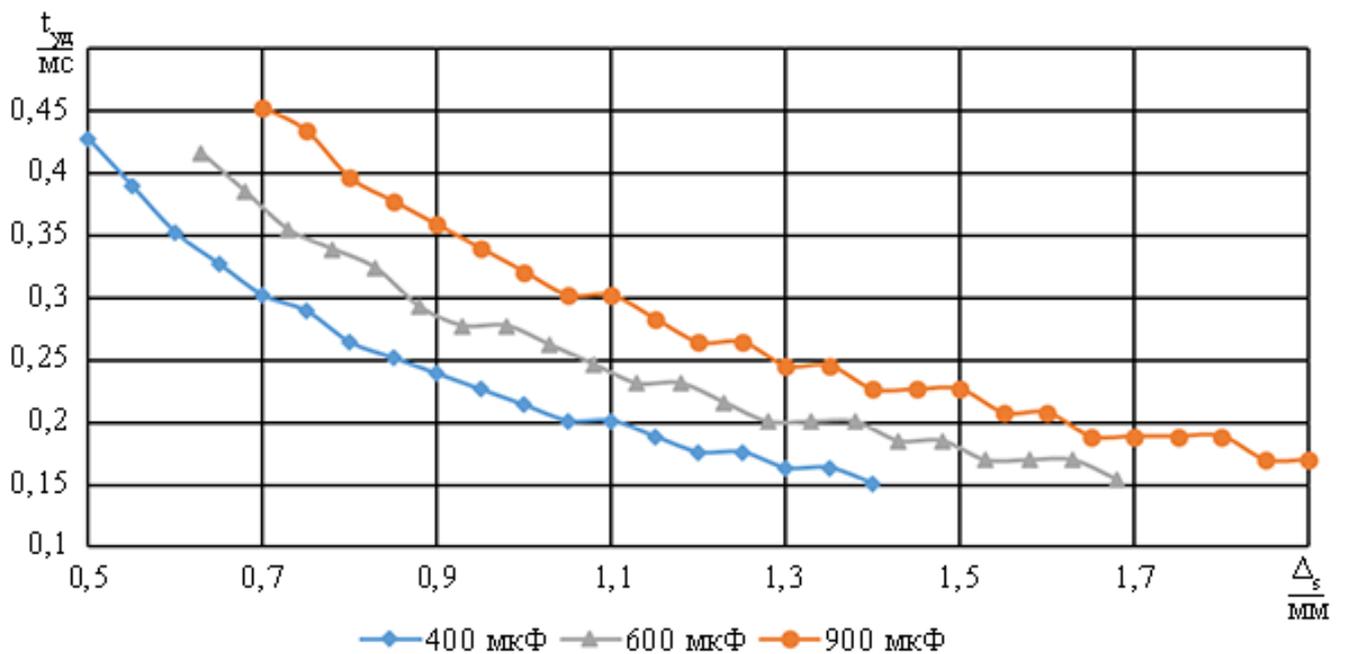


Рисунок 71 – Семейство кривых зависимости времени удара от параметров ИС

Для выбранного диапазона времен проведен поиск силы удара, при которой происходит выполнение критериев удаления капли при тяжении 49 Н. Радиус распространения эффективного и безопасного воздействия устройства принят равным половине дины пролета минус 1,42 % от длины пролета, что соответствует 0,1 м от концов пролета. Начальная дискретизация по времени выбрана равной 100 мкс. Методом численных экспериментов определено, что в рассматриваемой области времен удара граничными силами являются 600-1200 Н. Для этого диапазона выбрана дискретизация 200 Н. Таким образом, на первой итерации проведено 12 численных экспериментов. По алгоритму «Планирование

уточняющего эксперимента» рассчитано, что на следующей итерации при дискретизации времени 50 мкс и силы 100 Н необходимо провести 16 экспериментов общей продолжительностью 240 мин. Поверхность Парето для капель в радиусе распространения эффективного и безопасного воздействия устройства представлена на рисунке 72.

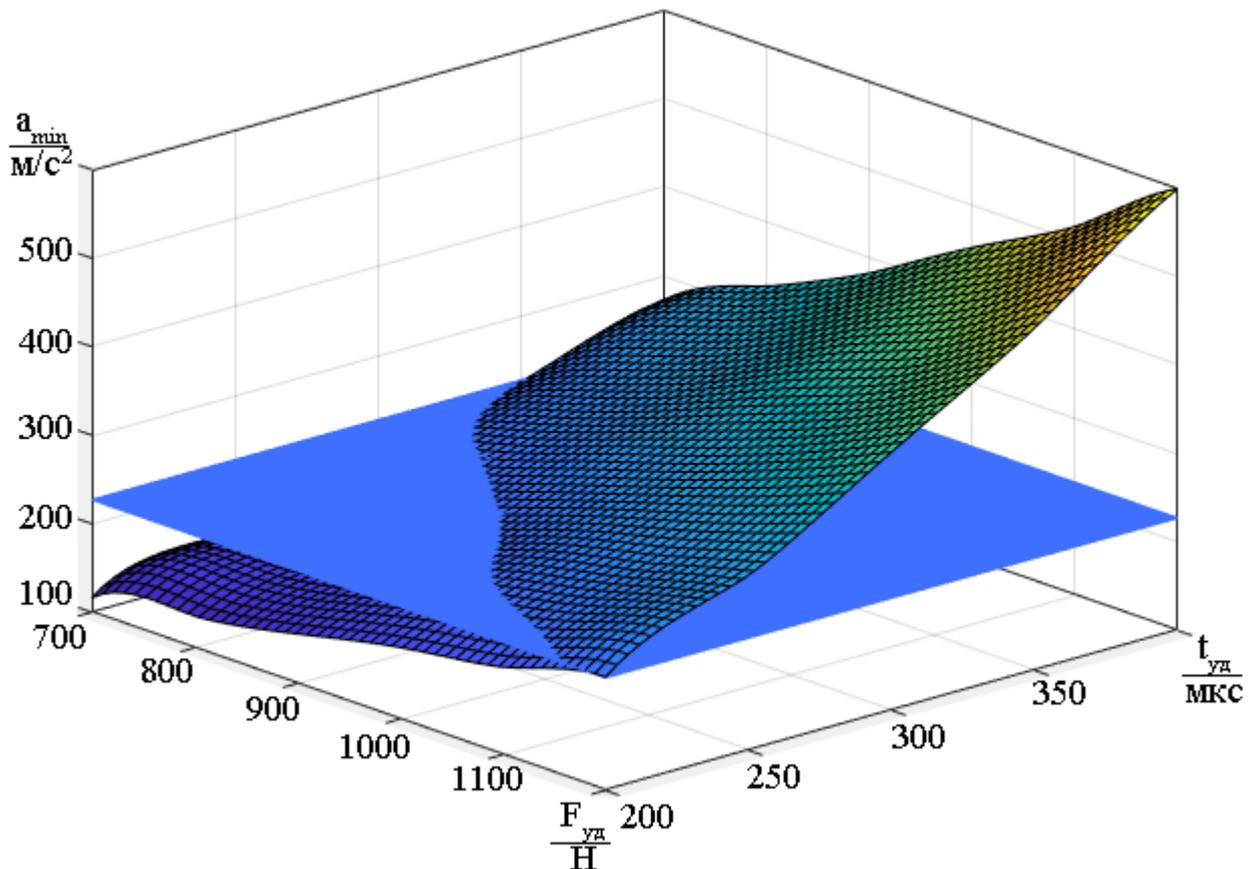


Рисунок 72 – Результирующее ускорение капли на конце пролета

Горизонтальная поверхность на рисунке соответствует ограничению (58) по ускорению. Ограничение (60) по амплитуде на рисунке не представлено, поскольку оно выполняется для всех рассмотренных точек.

Уже на пятом эксперименте становится известно, что в рассматриваемой области оптимальной является точка с параметрами 200 мкс, 1200 Н (ускорение  $228 \text{ м/с}^2$ , отклонение в конце полета 2,72 мм, отклонение бойка в центре пролета 13,7 мм), следующая за ней точка – 250 мкс, 1000 Н (ускорение  $241 \text{ м/с}^2$ , отклонение в конце полета 2,83 мм, отклонение бойка в центре пролета 14 мм).

Поиск параметров устройства выполняется путем решения системы уравнений аналитической модели электродинамического взаимодействия индуктора и бойка.

По расчетам получены значения амплитуды силы тока, напряжения заряда и емкости конденсатора при всех рассмотренных вариантах параметров удара (таблица 12). Оптимальность по амплитуде силы тока не соответствует оптимальности по импульсу силы удара.

Таблица 12 – Варианты напряжения заряда и емкости конденсатора

Емкость, мкФ/Время и сила удара	200 мкс, 1200 Н			250 мкс, 1000 Н		
	$\Delta_s$ , мм	I, А	U, В	$\Delta_s$ , мм	I, А	U, В
400	1.05	1728	320	0.85	1353	295
600	1.28	2076	290	1.08	1656	260
900	1.6	2393	260	1.2	1817	230

Сопоставляя таблицы 11 и 12 приходим к выводу, что для обеспечения наименьшей амплитуды силы тока и массы устройства при импульсе силы 0,25 Н\*с требуется один конденсатор 400 мкФ 300 В. Однако, для снижения тока, проходящего через каждый конденсатор, выбран вариант параллельного подключения двух конденсаторов емкостью 450 мкФ, что уменьшает риск их выхода из строя. Параметры устройства, рассчитанного по методике, приведены в таблице 13.

Таблица 13 – Параметры экспериментальной установки

Параметр	Значение
Внешний диаметр индуктора и бойка, м	$55 \cdot 10^{-3}$
Внутренний диаметр индуктора и бойка, м	$20 \cdot 10^{-3}$
Ширина шины индуктора, м	$1,2 \cdot 10^{-3}$
Высота шины индуктора, м	$3,6 \cdot 10^{-3}$
Высота бойка, м	$3,5 \cdot 10^{-3}$
Ширина изоляционного слоя, м	$0,01 \cdot 10^{-3}$
Количество витков спирали индуктора, шт.	14
Паразитная индуктивность, Гн	$3,5 \cdot 10^{-6}$
Паразитное активное сопротивление, Ом	$21,5 \cdot 10^{-3}$
Емкость накопительного конденсатора, Ф	$900 \cdot 10^{-6}$
Напряжение, до которого заряжается конденсатор, В	230

Параметр	Значение
Суммарная отталкиваемая масса со стороны индуктора и бойка, кг	0,079
Сила удара, Н	$10^3$
Время удара, с	$250 \cdot 10^{-6}$
Отклонение бойка, м	$14 \cdot 10^{-3}$
Сила инерции капли на конце пролета, Н	$0,505 \cdot 10^{-3}$

#### 4.4 Разработка экспериментальной установки

Рассмотрим функции основных блоков экспериментальной установки (рисунок 73).

*Зарядное устройство (ЗУ)* выполняет функцию питания блока накопления заряда (БНЗ) выпрямленным пульсирующим током по сигналу с блока управления (БУ). Таким образом, при построении функциональной схемы ЗУ необходимы следующие функциональные блоки:

- силовой электронный ключ (симистор), выполняющий функцию подключения и отключения БНЗ от источника питания (на схеме VT1);
- снаббер (RC-цепь) для подавления индуктивных выбросов, предотвращения ошибочного включения симистора, которое может произойти в результате сетевых помех и понижения значений перенапряжений в переходных процессах, которые появляются при коммутационных действиях с электронным ключом (на схеме Rs2, Cs2);
- выпрямитель (однофазный диодный мост в виде диодной сборки), преобразующий переменное напряжение 220 В в выпрямленное пульсирующее напряжение 300 В 4 А, необходимое для питания БНЗ (на схеме VD1-VD4).

*Блок накопления заряда (БНЗ)* выполняет функцию накопления заряда на конденсаторах до заданного с БУ уровня напряжения. Таким образом, при построении функциональной схемы БНЗ необходимы следующие функциональные блоки:

- емкостный накопитель энергии – саморазрядные импульсные пусковые конденсаторы общей емкостью 900 мкФ с допустимым уровнем заряда напряжением 300 В (на схеме C1, C2);
- высоковольтный делитель (ВВД), выполняющий функцию измерения текущего уровня заряда, снижения уровня сигнала до необходимого для БУ (на схеме R1 ... Rn);
- силовой электронный ключ (тиристор быстродействующий), способный коммутировать цепи с высоким напряжением и током (на схеме VS1);

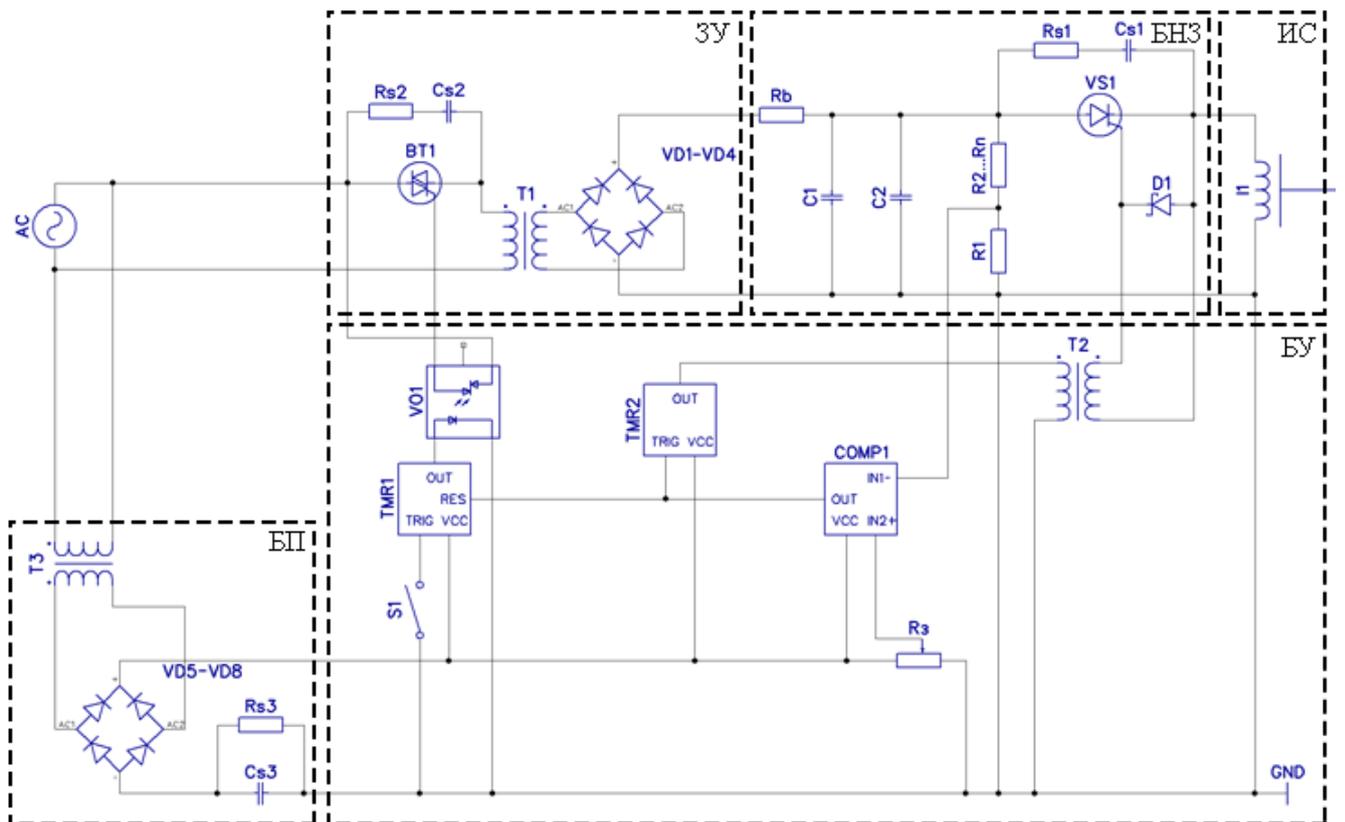


Рисунок 73 – Функциональная схема экспериментальной установки

- снаббер (RC-цепь) для исключения осцилляций тока после рабочего импульса (на схеме Rs1, Cs1);
- балластное сопротивление для ограничения тока заряда (на схеме Rb).

Блок управления (БУ) выполняет функцию управления процессом заряда БНЗ и его разряда на ИС. Таким образом, при построении функциональной схемы БУ необходимы следующие функциональные блоки:

– оптоотрон, выполняющий функцию подключения ЗУ к БНЗ на период заряда путем управления электронным ключом ЗУ. Он обеспечивает гальваническую развязку низковольтной управляющей части схемы и силового тиристорного ключа, а также подачу сигнала «запуск/останов заряда» в момент перехода сетевого напряжения через ноль, что минимизирует уровень создаваемых устройством помех (на схеме VO1);

– таймер 1, в составе ПРУ выполняющий функцию управления состоянием электронного ключа ЗУ. Команду о включении он получает при коммутации кнопки «Пуск», об отключении – по сигналу от компаратора или при превышении времени ожидания (1 с) (на схеме TMR1);

– компаратор, в составе ПРУ выполняющий функцию контроля уровня заряда, накопленного в БНЗ путем сравнения его с требуемым уровнем заряда, а также функцию подачи сигнала на отключение ЗУ от БНЗ, а затем разряд БНЗ на ИС (на схеме COMP1);

– таймер 2, в составе ПРУ выполняющий функцию задержки сигнала «запуск разряда» с целью ожидания гарантированного отключения ЗУ от БНЗ. Время задержки составляет больше полупериода колебаний переменного напряжения источника питания (на схеме TMR2);

– трансформатор, выполняющий функцию повышения напряжения сигнала «запуск разряда», передаваемого на электронный ключ БНЗ, согласования сигнала «запуск разряда», а также гальванической развязки с силовой линией (на схеме T2).

Кроме описанных функциональных блоков в состав БУ входят светодиодные датчики, сигнализирующие о состоянии подключения установки к источнику питания (вкл/выкл) и достижении на БНЗ заданного уровня заряда; кнопка «Пуск» (на схеме S1) и регулятор величины заряда (на схеме R3).

*Индукторная система* (ИС) выполняет функцию генерации импульсного магнитного поля, преобразования его в механический импульс и передачи механического импульса на провод ЛЭП. Таким образом, при построении функциональной схемы ИС необходимы следующие функциональные блоки:

– плоский индуктор (на схеме П), выполняющий функцию генератора импульсного магнитного поля. Возбуждение индуктора происходит при помощи емкостного накопителя энергии;

– боек, выполняющий функцию преобразователя электрического импульса в механический и передачи его на провод ЛЭП.

Электрическая принципиальная схема БУ и БНЗ приведена в приложении А.

Цикл работы устройства включает в себя следующие этапы. При помощи регулятора величины заряда, оператор задает количество энергии, запасаемой установкой. Также оператор выполняет запуск процесса накопления заряда с дальнейшим разрядом путем нажатия кнопки «Пуск». При этом пускорегулирующее устройство (ПРУ) подает сигнал «запуск заряда» с БУ на ЗУ. В момент, когда напряжение (и как следствие энергия) накопителя БНЗ в процессе заряда достигает заданного на регуляторе значения, ПРУ подает сигнал «останов заряда» с БУ на ЗУ, за счет чего происходит отключение БНЗ от источника питания. По остановке заряда ПРУ подает сигнал «запуск разряда» на БНЗ, в результате которого коммутирующее устройство БНЗ обеспечивает замыкание цепи для разряда накопителя энергии на ИС и размыкание цепи при переходе тока разряда через ноль. Общий вид установки приведен на рисунке 74.

Рассмотрим основные требования к конструкции установки. Центральным узлом устройства, которое определяет все остальные решения, является ИС. Помимо выбора электрических и геометрических параметров широкие возможности открывает подход по выбору конфигурации индуктора и бойка. Возможны различные формы ИС: цилиндрические индукторы – соленоиды (одновитковые, многослойные спиральные), плоские спиральные индукторы-катушки или индукторы-прямоугольники (одновитковые, многослойные плоские/квадратного/прямоугольного/круглого сечения, одно-/многослойные). Бойки могут быть притягивающимися (имеется только дисковая часть), втягивающимися (имеется только аксиальная часть) и комбинированными [98, 151]. Известны экспериментальные и теоретические исследования, касающиеся сравнения эффективности различных конструкций ИС [103, 152, 153], в том

числе, с электромагнитным или ферромагнитным экраном [154], подвижным индуктором, квазистационарным бойком [98], усилением магнитной связи бойка и индуктора [155]. Однако, следует отметить, что авторы принимают различные критерии эффективности, которые значительно зависят от технологической задачи, для которой предназначено устройство. Это связано с тем, что параметры выполняемой операции многофакторны и чувствительны к условиям функционирования. В связи с этим в каждом конкретном случае должны быть определены показатели эффективности разрабатываемого исполнительного устройства и проанализированы в этой реализации возможные варианты конструкции. Представленные в литературе методы расчета ИС [114, 156], а также предыдущий опыт могут быть полезны для этой цели.

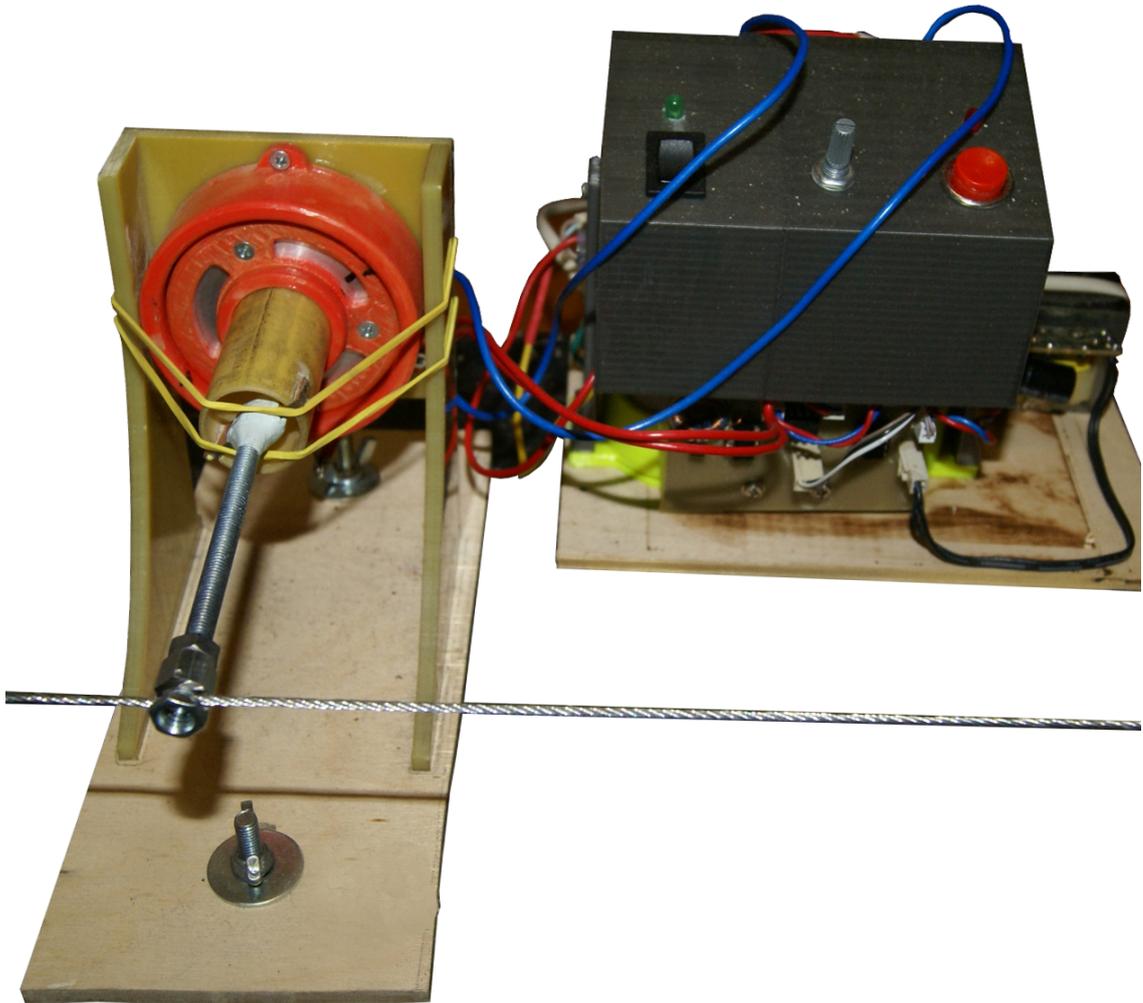


Рисунок 74 – Общий вид установки

Индуктор во многом определяет конструкцию исполнительного устройства, конфигурацию, скоростные и силовые показатели бойка, величину и скорость

нарастания тока возбуждения, тепловые режимы и массогабаритные показатели. Он характеризуется целым рядом как конструктивных, так и технологических параметров: степенью чистоты и состояния медного провода, условиями и плотностью пропитки, качеством укладки и изгибов провода, параметрами и состоянием изоляции и др. [157]. Индуктор работает в очень сложных режимах: на него действуют значительные динамические нагрузки, соответствующие создаваемому магнитному полю, прикладывается высокое напряжение, в процессе эксплуатации индуктор нагревается до высоких температур. Поэтому индуктор должен обладать высокой механической прочностью, стойкостью к электрическим перенапряжениям, а также иметь простое конструктивное исполнение. В качестве материалов для индукторов многократного использования должны применяться материалы с высокой удельной величиной растягивающего напряжения и достаточно высокой электропроводностью – медь, латунь, бронза, низкоуглеродистые стали. Хорошие показатели имеют высокопрочные материалы (вольфрам и молибден) и сплавы (бериллиевая бронза, сплавы меди с кадмием, цирконием). Рабочая обмотка индуктора изготавливается из изолированной электропроводной шины прямоугольного сечения. Прямоугольное сечение витков индуктора способствует созданию более равномерного магнитного поля. Спираль индуктора укрепляют в прочном изолирующем корпусе, выполненном из текстолита, дельтадревесины, фторопласта и т.д. С целью изоляции индуктора и дополнительного повышения его механической прочности, конструкция заливается компаундом. Толщина слоя изоляции между витками индуктора и бойком не должна превышать 0,5-1,5 мм, так как с увеличением толщины изоляции увеличивается рассеивание магнитного потока и снижается к.п.д. установки. Изоляционными материалами, применяемыми в индукторах, служат лавсановые, фторопластовые и полиамидные пленки, слюда, стеклотекстолит, различные смолы и компаунды, стекловолокно, пропитанное эпоксидными смолами.

Для экспериментальной установки выбрана конфигурация ИС простого конструктивного исполнения: индуктор в форме дисковой катушки

прямоугольного сечения и плоский боек. Рабочая обмотка индуктора изготовлена из изолированной медной шины прямоугольного сечения, что способствует созданию более равномерного магнитного поля. Спираль индуктора 3,6x1,2 мм уложена в корпус из ABS пластика и залита компаундом, высота изоляции составляет 1,3 мм.

Боек рекомендуется выполнять из материалов с высокой удельной электропроводностью, например, из серебра, золота, меди, магния, алюминия. Внешний и внутренний диаметры бойка и индуктора должны быть равны. В противном случае радиальная составляющая магнитного поля приводит к деформации бойка вплоть до его разрыва [158].

Расположение отверстий в бойке и их количество влияют на величину импульса ЭМС [159]. В наибольшей степени снижение импульса силы наблюдается при расположении отверстий вблизи половины внешнего диаметра бойка (при внутреннем диаметре равном 0,1 от внешнего). Это можно объяснить тем, что в этой области бойка индуцируется ток с наибольшей плотностью. Если отверстия расположены вблизи наружного диаметра бойка, то происходит даже некоторое повышение импульса силы, что можно пояснить выталкиванием индуцированного тока в среднюю часть бойка. Увеличение количества отверстий (от 0 до 4) влияют на величину импульса силы незначительно (в пределах 1 %).

Боек экспериментальной установки изготовлен из алюминия, диаметры бойка соответствуют диаметрам индуктора, высота бойка 3,5 мм, боек закреплен в пластиковом корпусе при помощи болтов через 3 отверстия вблизи наружного диаметра.

Перемещение бойка при прямом ходе осуществляется под действием силы Ампера со стороны индуктора, при обратном ходе – под действием возвратного механизма. В качестве такого механизма могут использоваться различные конструктивные решения: например, возвратная пружина или предложенный в [155] ферромагнитный стержень с наконечником, который посредством небольшой силы притяжения, возникающей между ним и сердечником электромагнита прижимает ударный элемент.

Емкостный накопитель – наиболее дорогой энергетический узел установки. Рекомендуется отдать предпочтение высоковольтным импульсным пусковым конденсаторам в связи с особенностями разряда конденсатора на ИС, такими как большая амплитуда импульса разрядного тока и высокая скорость нарастания мгновенного значения тока (быстрый вклад энергии, запасенной в конденсаторе, в нагрузку), требования к уровню заряда при минимальной собственной индуктивности и активном сопротивлении. Следует отдавать предпочтение конденсаторам с минимальной массой и габаритами.

В качестве емкостного накопителя в экспериментальной установке используется батарея из двух импульсных конденсаторов, соединенных параллельно. Такая схема включения обусловлена возможностью получения требуемой энергии. Время заряда конденсаторной батареи до напряжения 230 В составляет 6 с. Электрические параметры конденсатора приведены в таблице 14.

Таблица 14 – Электрические параметры CD60

Параметр	Значение
Номинальная накопительная емкость $C_{\text{ном}}$ , мкФ	450
Номинальное напряжение $U_{\text{ном}}$ , В	300
Тангенс угла потерь $\text{tg}\delta$	0,15
Накапливаемая энергия, Дж	20,25
Габаритные размеры, мм	50x100
Масса, кг	0,18

Схема и конструкция электронного ключа для запуска разряда индуктора должна обеспечивать минимальные собственную индуктивность и активное сопротивление, высокую работоспособность и способность коммутировать высокие токи при высокой частоте разрядного контура. В качестве электронного ключа в установке используется тиристор быстродействующий ТБ242-63-14, способный коммутировать цепи с высоким напряжением (до 1,4 кВ) и током (до 63 А). Электрические параметры тиристора приведены в таблице 15.

Таблица 15 – Электрические параметры ТБ242-63-14

Параметр	Значение
Максимально допустимый средний ток в открытом состоянии $I_{T(AV)}$ , А	63
Максимально допустимый действующий ток в открытом состоянии $I_{TRMS}$ , А	98
Ударный ток в открытом состоянии $I_{TSM 10 ms}$ , кА	1,1
Повторяющийся импульсный обратный ток $I_{RRM}$ , Повторяющийся импульсный ток в закрытом состоянии $I_{DRM}$ , мА	20
Повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии $V_{DRM}$ , Повторяющееся импульсное обратное напряжение $V_{RRM}$ , В	400-1400
Импульсное напряжение в открытом состоянии $V_{TM}$ , В	2,2
Импульсный ток в открытом состоянии $I_{TM}$ , А	198
Отпирающий постоянный ток управления $I_{GT}$ , мА	200

ПРУ может быть реализован в виде микроконтроллера с программным управлением (микроЭВМ) либо посредством элементной базы. Второй вариант является более надежным в условиях магнитных помех, возникающих при работе устройства, однако более трудоемким при проектировании и менее универсальным. В экспериментальной установке ПРУ реализован посредством элементной базы: двух таймеров NE555P и компаратора LM311.

Минимизация паразитной индуктивности и сопротивления является важной задачей, потому что это способствует более полному переходу энергии конденсаторной батареи в энергию импульсного магнитного поля. Наибольший вклад в паразитную индуктивность и сопротивление вносят провода, по которым проходит импульс тока, содержащий высокочастотные гармоники. Поскольку паразитная индуктивность прямо пропорциональна длине и обратно пропорциональна ширине проводов [160], в колебательном контуре важно использовать как можно более короткие провода большого сечения, а также малоиндуктивные выводы для подключения ИС.

Штанга, корпус устройства и другие элементы, соединяющие боек с проводом, должны быть выполнены из легкого и неупругого изоляционного материала. Для этой цели должен использоваться жесткий диэлектрик, например, пластмасса или стеклотекстолит, обладающий необходимой механической и электрической прочностью. Наилучшие условия крепления штанги к проводу создаются в зажимах с широким устьем и закругленными краями в месте выхода провода.

Во избежание попадания импульсной помехи в питающую сеть целесообразно выполнять отключение разрядного контура от питающей сети до разряда конденсаторной батареи на ИС. В экспериментальной установке для этой цели в ПРУ таймер 2 реализует задержку сигнала «запуск разряда». Время задержки составляет больше полупериода колебаний переменного напряжения источника питания, что гарантирует отключение ЗУ от БНЗ.

Традиционные ЛИИЭП как правило, не содержат специальных элементов, обеспечивающих снижение внешних магнитных полей, возбуждаемых при работе. Вследствие этого возникает проблема электромагнитной совместимости с близко расположенными электронными приборами и негативное влияние импульсных магнитных полей на обслуживающий персонал. Для ослабления электромагнитных полей, а именно для того, чтобы исключить проникновение и воздействие таких полей на элементы конструкции ЛЭП, необходимо применять экранирование. На эффективность экранирования оказывают существенное влияние частота поля, электропроводность и магнитная проницаемость материала, конфигурация, размеры и толщина экрана. Для изготовления экранов зачастую используются радиоотражающие материалы (металлы) в форме листовых, фольгированных, сетчатых материалов, проводящих покрытий. Принципиально следует иметь в виду, что эффективность экранирования зависит от наличия дефектов и отверстий в стенке экрана, поэтому для соединения деталей экрана целесообразно использовать электропроводные клеи вместо пайки или болтовых соединений. Кроме этого, эффективность экранирования зависит от того, что внутри экранированных объемов могут возникать резонансные эффекты. При этом необходимо учитывать влияние экранирования на электромеханические

и энергетические показатели ЛИИЭП. Например, в работе [161] исследовано влияние на работу ИС электромагнитного экрана (ЭМЭ), выполненного из технической меди толщиной 1 мм, и ферромагнитного экрана (ФМЭ), выполненного из технической стали марки Ст.10 (AISI 1010). Экспериментальная установка не содержит экранов для снижения влияния магнитных полей на внешние электронные приборы.

#### **4.5 Энергоэффективность устройства для предупреждения гололедообразования**

Сравним полномасштабное устройство, параметры которого приведены в 3 главе (емкость конденсаторной батареи 3000 мкФ, напряжение заряда 455 В), с тепловым методом в соответствии с разработанными критериями эффективности решения для борьбы с гололедообразованием на проводах ЛЭП как комплекса мер. Будем рассматривать критерии из расчета продолжительности гололедоопасной обстановки 1 час и длины линии, подвергающейся обледенению – 80 км.

*Энергозатраты на работу решения.* Энергозатраты одного устройства на один удар составляют 310 Дж или 0,04 Вт\*ч. В пересчете на участок двухцепной ЛЭП длиной 80 км при длине одного пролета 200 м, всего 400 пролетов, по 3 устройства на пролет, энергозатраты 1200 устройств за один час ежеминутной работы составят 6,25 кВт\*ч, что более чем в 5000 раз меньше, чем при плавке гололеда с помощью двух ВУПГ-14/1200.

*Продолжительность отключения энергопотребителей.* В отличие от теплового метода, реализуемого с помощью ВУПГ-14/1200, отключение потребителей на период проведения антигололедных мероприятий не требуется.

*Затраты на доставку и управление:* Контроль технологического процесса предупреждения гололедообразования – задача, определяющая своевременность, а значит эффективность предложенного метода. Инклиметрические параметры, характеризующие наступление гололедоопасной обстановки, являются сигналом к запуску или остановке процесса предупреждения гололедообразования.

На рисунке 75 представлена функциональная схема одноконтурной АСУ устройством для предупреждения образования наледи на основе ЛИИЭП без обратной связи (управление по возмущению), позволяющая при наличии программного обеспечения устройства управления (УУ) и аппаратной реализации остальных систем организовать генерацию расчетного оптимального воздействия с учетом текущего состояния гололедоопасной обстановки.

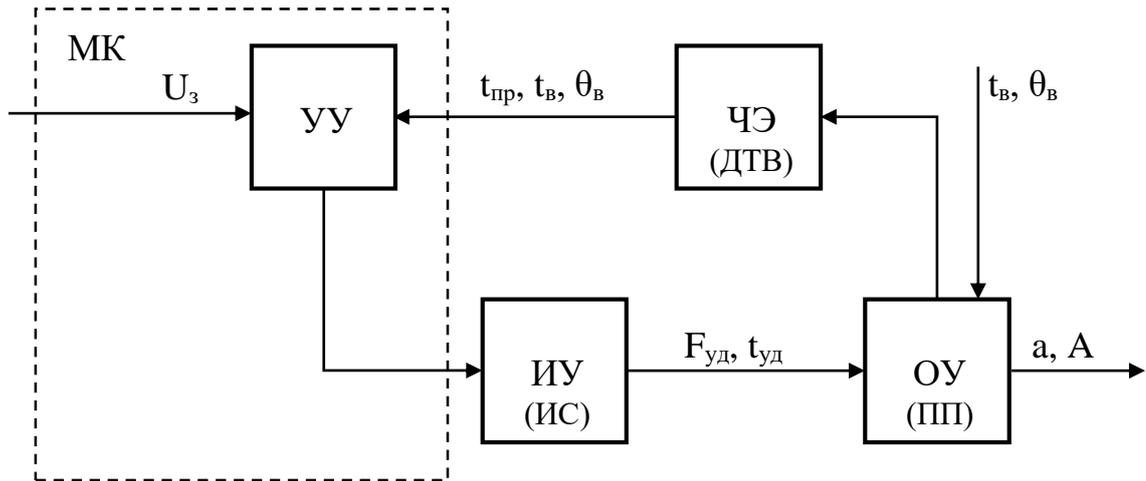


Рисунок 75 – Функциональная схема одноконтурной АСУ устройства для предупреждения гололедообразования на ЛЭП

Возможность контроля чувствительного элемента (ЧЭ) и принятия решений о запуске и остановке исполнительного устройства, и, следовательно, разработка алгоритмического и программного обеспечения УУ требует дальнейшего изучения. В приведенной схеме ИУ – исполнительное устройство, в качестве которого выступает индукторная система (ИС); ОУ – объект управления, в качестве которого выступает пара проводов, на которых закреплено устройство (ПП); ЧЭ – чувствительный элемент в виде датчиков температуры окружающей среды и провода, влажности окружающей среды (ДТВ); УУ управляет запуском и остановкой ИУ, реализуется на микроконтроллерной платформе (МК). В качестве возмущающего воздействия выступает изменение температуры и влажности воздуха  $t_{в}, \theta_{в}$ . Контур обратной связи строится по данным регистрации ЧЭ –  $t_{пр}, t_{в}, \theta_{в}$ . Управляющее воздействие – сила и время удара  $F_{уд}, t_{уд}$ .

Представленная функциональная схема требует своего наполнения: разработки соответствующего алгоритмического, программного, технического обеспечения. Дополнительно следует сказать, что построение алгоритмов управления процессами предупреждения гололедообразования промышленного использования с максимальной степенью универсальности по обслуживаемым пролетам возможно при всестороннем исследовании взаимовлияния параметров и состояния устройства, гололедоопасной обстановки и проводов в процессе предупреждения гололедообразования.

*Повреждение элементов конструкции ЛЭП.* В процессе работы ударного устройства повреждению подвергаются провода ЛЭП. Стоимость 1 м провода АС120/19 составляет 100 руб., что в пересчете на 80 км по 6 проводов в пролете составляет 48 млн. руб.

*Стоимость:* стоимость 1200 устройств на 80 км из расчета 30000 руб. составляет 36 млн. руб. Таким образом, затраты на приобретение решения по предупреждению гололедообразования тем меньше, чем меньше протяженность рабочего участка. Для работы решения требуется приобретение системы прогнозирования гололедоопасных погодных условий и мониторинга гололеда на проводах.

#### **Выводы по главе 4**

1. Разработана методика проектирования устройства предотвращения образования льда на основе ЛИИЭП. Сформулирована оптимизационная задача поиска параметров удара и устройства для его реализации, которая решается в рамках одного из этапов методики. Расчет динамики провода и присоединенной капли в зависимости от режима работы устройства выполняется при помощи численной модели. Разработана программная реализация алгоритма, предназначенного для упрощения задачи анализа значений, полученных на очередной итерации. Расчет электрических параметров ИС выполняется путем решения аналитической модели электродинамического взаимодействия индуктора и бойка в ЛИИЭП.

2. Выполнен расчет экспериментальной установки для модели пролета ЛЭП с учетом условий подobia. Разработаны функциональные и принципиальные электрические схемы установки. Разработана измерительная система. Выполнены лабораторные испытания.

3. Подтверждена энергоэффективность разработанного устройства по предупреждению гололедообразования в сравнении с тепловым методом, реализуемым при помощи ВУПГ-14/1200. Ресурсосбережение при использовании предложенного решения тем выше, чем меньше протяженность рабочего участка.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

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 %.

**СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ**

ЛЭП – линии электропередачи.

ОЗП – осенне-зимний период.

ОГЯ – опасное гидрометеорологическое явление.

НУП – неблагоприятные условия погоды.

ВУПГ –выпрямитель управляемый для плавки гололеда.

СУРЗА – система управления, регулирования, защиты и автоматики.

УПГМ –установка для плавки гололеда мобильная.

МСУПГ – мобильная система управляемой плавки гололеда.

DAC – De-icer Actuated by Cartridge.

EIDI – Electro-impulse de-icing.

ВЛ – воздушная линия.

ИС – индукторная система.

НДС – напряженно-деформированное состояние.

ЛИИЭП – линейный импульсно-индукционный электромеханический преобразователь.

АЦП – аналого-цифровой преобразователь.

ПК – персональный компьютер.

АСУ – автоматизированная система управления.

ЭМС – электромагнитная сила.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Абдулвелеев, И. Р. Расчет воздушных линий электропередачи на основе комплексного моделирования / И. Р. Абдулвелеев, Г. П. Корнилов // Промышленная энергетика. – 2014. – № 6. – С. 12-19.
2. Добрусин, Л. А. Повышение энергоэффективности электросетевого комплекса России / Л. А. Добрусин // Энергосбережение. – 2013. – № 7. – С. 54-61.
3. Правила устройства электроустановок. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 1999-2005.
4. Коршунова, Н. Н. Стихийные гидрометеорологические явления на территории России в 2015 году [Электронный ресурс] / Н. Н. Коршунова // ФГБУ «ВНИИГМИ-МЦД». – 2015. – Режим доступа: <http://meteo.ru/component/content/article/118-chrezvychnye-situatsii-v-rossii/620-chrezvycha>.
5. Бударгин, О. М. Прохождение осенне-зимнего периода 2016/2017 годов [Электронный ресурс] / О. М. Бударгин // ПАО «Россети». – 2017. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/2065>.
6. Итоги прохождения группой компаний «Россети» осенне-зимнего периода 2017/2018 годов. Основные задачи по подготовке к осенне-зимнему периоду 2018/2019 годов [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». – 2018. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/7822>.
7. Итоги прохождения группой компаний «Россети» осенне-зимнего периода 2018/2019. Основные задачи по подготовке к осенне-зимнему периоду 2019/2020 [Электронный ресурс] // ПАО «Россети». – 2019. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/11896>.
8. Грабчак, Е. П. Подготовка к осенне-зимнему периоду 2016-2017, прохождение и основные итоги ОЗП 2015-2016 / Е. П. Грабчак, И. А. Байков, Е. А. Медведева [и др.] ; под ред. зам. Министра энергетики РФ А. В. Черезова. М. : Министерство энергетики Российской Федерации, 2016. – 216 с.

9. Режимно-балансовая ситуация в ЕЭС России в ОЗП 2014-2015 г. [Электронный ресурс] // Министерство энергетики Российской Федерации. – 2018. – Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/2274/2634>.
10. Инвестиционная деятельность: годовой отчет 2016 ПАО «ФСК ЕЭС» [Электронный ресурс] // ПАО «ФСК ЕЭС». – 2016. – Режим доступа: [http://report2016.fsk-ees.ru/strategic\\_report/investing\\_activities/](http://report2016.fsk-ees.ru/strategic_report/investing_activities/).
11. Farzaneh, M. Atmospheric Icing of Power Networks / M. Farzaneh. – Canada : Springer, 2008. – 381 p.
12. Никитина, И. Э. Способы удаления льда с проводов линий электропередачи / И. Э. Никитина, Н. Х. Абдрахманов, С. А. Никитина // Нефтегазовое дело. – 2015. – № 3. – С. 794-823.
13. Сухоруков, С. И. Автоматизированная система удаления льда с проводов ЛЭП : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Сухоруков Сергей Иванович. – Комсомольск-на-Амуре, 2016. – 220 с.
14. Ярославский, Д. А. Система автоматизированного мониторинга гололедных отложений воздушных линий электропередач на основе инклинометрическо-метеорологического метода : дис. ... канд. техн. наук : 05.11.13 / Ярославский Данил Александрович. – Казань, 2017. – 135 с.
15. Шкапцов, В. Системы прогнозирования и мониторинга сброса гололеда / В. Шкапцов // Электроэнергия. Передача и распределение. – 2011. – № 1 (4). – С. 24-28.
16. Диагностика, реконструкция и эксплуатация воздушных линий электропередачи в гололедных районах : учебное пособие / И. И. Левченко, А. С. Засыпкин, А. А. Аллилуев, Е. И. Сацук. – М.: Изд. дом МЭИ, 2007. – 494 с.
17. Дербенев, А. А. Сравнительный анализ различных способов борьбы с гололедом на линиях электропередачи в контексте климатических условий ХМАО-Югры / А. А. Дербенев, П. В. Рысев // Материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара «Актуальные проблемы автоматизации энергосбережения в ТЭК России» : Сб. научн. тр. – Нижневартовск : Изд-во Нижневарт. гос. ун-та. – 2018. – С. 107-114.

18. Farzaneh, M. Systems for prediction and monitoring of ice shedding, anti-icing and de-icing for overhead lines / M. Farzaneh, J. Franc, M. P. Arabani et al. // *Electra*. – 2010. – no. 253. – P. 51-57.
19. Сладкова, Л. А. Анализ способов борьбы с ледообразованием / Л. А. Сладкова, А. Н. Неклюдов, А. Н. Кузнецов // *Мир транспорта*. – 2019. – № 1 (17). – С.180-191. DOI: 10.30932/1992-3252-2019-17-1-180-191.
20. Sadov, S. Y. Mathematical Model of Ice Melting on Transmission Lines / S. Y. Sadov, P. N. Shivakumar, D. Firsov et al. // *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*. – 2007. – vol. 6. – P. 273-286. DOI: 10.1007/s10852-006-9043-4.
21. Антонов, Б. М. Создание мобильной установки для плавки гололеда на проводах ВЛ и энергоэффективность ее использования / Б. М. Антонов, Э. Х. Исакаев, П. А. Коновалов [и др.] // *Известия академии наук. Энергетика*. – 2013. – № 4. – С. 155-159.
22. Дёмин, Ю. В. Обоснование возможности предупреждения гололёда на проводах и тросах воздушных линиях электропередач / Ю. В. Дёмин, Б. В. Палагушкин, С. Н. Реутов [и др.] // *Материалы Всероссийского с международным участием научно-практического семинара «Актуальные проблемы автоматизации энергосбережения в ТЭК России»* : Сб. научн. тр. – Нижневартовск : Изд-во Нижневарт. гос. ун-та. – 2018. – С. 97-101.
23. Petrenko, V. F. Variable-resistance conductors (VRC) for power-line de-icing / V. F. Petrenko, Ch. R. Sullivan, V. Kozlyuk // *Cold Regions Science and Technology*. – 2011. – No. 65. P. 23-28. DOI: 10.1016/j.coldregions.2010.06.003.
24. Березин, М. А. Ветер и объекты электроэнергетики (надежность конструкций) / М. А. Березин, М. М. Березин, Ю. В. Дёмин [и др.]. – Новосибирск : Изд-во НГАВТ, 2008. – 380 с.
25. 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://mnv.irgups.ru/statisticheskiy-analiz-avariynyh-otklyucheniy-elektroenergii-iz-zagololedoobrazovaniya-na-provodah>.

26. Минуллин, Р. Г. Опыт многоканального локационного мониторинга гололеда на линиях электропередач / Р. Г. Минуллин, Ю. А. Горюшин, А. И. Борщевский [и др.] // Энергетика Татарстана. – 2015. – № 2 (38). – С. 19-27.

27. Титов, Д. Е. Мониторинг интенсивности гололедообразования на воздушных линиях электропередачи и в контактных сетях : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 / Титов Дмитрий Евгеньевич. – Саратов, 2014. – 150 с.

28. 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.

29. 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.

30. 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.

31. 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.

32. Espinoza, E. H. Principle of functioning of smart solution to clean high power lines in cold climate : Master's thesis in Industrial Engineering / Edison Hover Caicedo Espinoza. – Tromsø, 2018. – 75 p.

33. Засыпкин, А. С. Расчетные таблицы для выбора и анализа схем плавки гололеда на воздушных линиях электропередачи / А. С. Засыпкин, Е. И. Сацук, А. Н. Щуров. – Новочеркасск : Изд-во ЮРГПУ (НПИ), 2015. – 104 с.

34. Ji, K. Evaluation and optimization of a shock load de-icing method for transmission lines with combined ice failure criteria / K. Ji, B. Li, Y. Cheng et al. // Cold Regions Science and Technology. – 2019. – No. 165, art. 102818. DOI: 10.1016/j.coldregions.2019.102818.

35. Leblond, A. Development of a portable de-icing device for overhead ground wires / A. Leblond, B. Lamarche, D. Bouchard et al. // Proceedings of the 11th Int. workshop on atmospheric icing of structures (IWAIS XI). – Montréal. – 2005. – P. 399-404.

36. Мельникова, Н. А. Численное моделирование деформирования и разрушения анизотропных сред (на примере озерного льда) : дис. ... канд. физ-мат. наук : 01.02.04 / Мельникова Наталья Александровна. – Томск, 2010. – 165 с.

37. Гольдштейн, Р. В. Адгезионная прочность гололедных отложений на элементах металлических конструкций / Р. В. Гольдштейн, В. П. Епифанов // Вестник НГУ. Серия: Математика, механика, информатика. – 2012. – № 4 (12). – С. 21-40.

38. Коржавин, К. Н. Исследование механических свойств речного льда / К. Н. Коржавин. – Новосибирск : НИВИТ, 1940. – 36 с.

39. Карташкин, Б. Д. Экспериментальные исследования физико-механических свойств льда / Б. Д. Карташкин. – М. : Бюро новой техники, 1947. – 43 с.

40. Бычковский, Н. Н. Ледовые строительные площадки, дороги и переправы / Н. Н. Бычковский, Ю. А. Гурьянов ; под общ. ред. Н. Н. Бычковского. – Саратов : Саратов. гос. техн. ун-т, 2005. – 260 с.

41. Богородский, В. В. Физика океана / В. В. Богородский, А. В. Гусев, Ю. П. Доронин [и др.] : под ред. Ю. П. Доронина. – Л. : Гидрометеиздат, 1978. – 296 с.

42. Доронин, Ю. П. Морской лед / Ю. П. Доронин, Д. Е. Хейсин. – Л. : Гидрометеиздат, 1975. – 318 с.
43. Коржавин, К. Н. Воздействие льда на инженерные сооружения / К. Н. Коржавин. – Новосибирск : СО АН СССР, 1962. – 224 с.
44. 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.
45. Вершинин, С. А. Разрушение и деформации морских ледяных полей, взаимодействующих с объектами континентального шельфа : дис. ... докт. физ-мат. наук : 11.00.08 / Вершинин Станислав Александрович. – Москва, 1984. – 408 с.
46. Физика и механика льда / ред. П. Трюде ; пер. с англ. под ред. Р. В. Гольдштейна. – Москва : Мир, 1983. - 348 с.
47. Лобанов, В. А. Моделирование льда в задачах с конечно-элементной постановкой / В. А. Лобанов // Дифференциальные уравнения и процессы управления : электрон. науч. журн. – 2008. – № 4. – Режим доступа: <https://diffjournal.spbu.ru/RU/numbers/2008.4/article.1.2.html>.
48. Мельникова, Г. В. Математическое моделирование повреждений рабочих лопаток вентиляторов при попадании льда / Г. В. Мельникова, В. С. Мацаренко, Н. Н. Серебряков // труды ЦИАМ № 1344 : Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей. – 2010. – С. 107-118.
49. Богородский, В. В. Разрушение льда. Методы, технические средства / В. В. Богородский, В. П. Гаврило, О. А. Недошивин. – Л. : Гидрометеиздат, 1983. – 232 с.
50. Труды транспортно-энергетического института. Вып. 7. Вопросы ледотехники / АН СССР, Запад.-Сибир. фил. ; отв. ред. К. Н. Коржавин. – Новосибирск : Новосиб. кн. изд-во, 1958. – 112 с.

51. Ji, K. A novel ice-shedding model for overhead power line conductors with the consideration of adhesive/cohesive forces / K. Ji, X. Rui, L. Li et al. // *Computers & Structures*. – 2015. – No. 157. – P. 153-164.

52. 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.

53. Patent CA 1998/2207152 Apparatus for deicing overhead wires and cables / M. A. Allaire, J. L. Laforte. – 1998. – 2 p.

54. De-icing techniques before, during, and following ice storms: report // CEATI. – 2002. – Available at: <https://www.ceati.com/projects/publications/publication-details/?pid=3303>.

55. Пат РФ № 2067345. Устройство для удаления инородных тел с токоведущих элементов / В. Д. Карминский, А. С. Бочев, Е. С. Филь. – 1996.

56. А. с. 615560 СССР. Устройство для удаления льда / И. А. Левин, А. И. Кульчицкий, Н. Н. Ершов, М. Б. Улановский. Бюл. № 26, 1978.

57. Egbert, R. I. An Investigation of Power Line De-Icing by Electro-Impulse Methods / R. I. Egbert, R. L. Scharag, W. D. Bernhart et al. // *IEEE Power & Energy Society*. – 1989. – No. 4 (3). – P. 1855-1861.

58. Пат РФ № 2446532. Способ удаления льда и снега с проводов и грозозащитных тросов линий электропередачи и устройство для его осуществления / Е. Н. Иванов. – 2012.

59. Пат РФ № 2481684. Устройство для сброса гололедных отложений с проводов / Д. М. Белый, Г. Ф. Афанасьев. – 2013.

60. Пат РФ № 2442256. Способ удаления обледенения с проводов линий электропередач / В. М. Козин, В. А. Соловьев, Д. А. Орлов [и др.]. – 2012.

59. Болух, В. Ф. Практическая реализация линейных импульсных электромеханических преобразователей в промышленных устройствах / В. Ф.

Болюх, С. В. Олексенко, И. С. Щукин // Вісник НТУ «ХПІ». – 2016. – № 11 (1183). – С. 55-63.

61. Пат РФ № 2166826. Способ удаления гололеда с проводов контактной сети и линий электропередачи / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – 2001.

62. Landry, M. De-icing EHV Overhead Transmission Lines by Short-circuit Currents / M. Landry, R. Beauchemin, A. Venne // IEEE Canadian Review. – 2001. – No. 37. – P. 10-14.

63. Шклярчук, Ф. Н. Нелинейные колебания и галопирование провода с обледенением / Ф. Н. Шклярчук, А. Н. Данилин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2013. – № 11. – С. 188-197.

64. Зимон, А. Д. Адгезия пленок и покрытий / А. Д. Зимон. – М. : Химия, 1977. – 352 с.

65. Коллоидная химия : примеры и задачи : учебное пособие / В. Ф. Марков, Т. А. Алексеева, Л. А. Брусницына, Л. Н. Маскаева : науч. ред. В. Ф. Марков. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2015. – 188 с.

66. Образование и прогнозирование замерзающих осадков: обзор литературы и некоторые новые результаты / Н. П. Шакина, И. А. Хоменко, А. Р. Иванова, Е. Н. Скриптунова // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. – 2012. – № 348. – С. 1-27.

67. Бучинский, В. Е. Атлас обледенения проводов / В. Е. Бучинский : под ред. А. Д. Заморского. – 2-е изд. доп. – Л. : Гидрометеорологическое издательство, 1966. – 116 с.

68. Алексеенко, С. В. Численное моделирование обледенения цилиндра и профиля. Обзор моделей и результаты расчетов / С. В. Алексеенко, А. А. Приходько // Ученые записки ЦАГИ. – 2013. – № 6 (XLIV). – С. 25-57.

69. Lacavalla, M. Wet-snow activity research in Italy / M. Lacavalla, P. Marcacci, A. Freddo // Proceedings of the 16th Int. workshop on atmospheric icing of structures (IWAIS XVI). – Uppsala. – 2015. – P. 17-24.

70. Расчёт установившейся температуры провода воздушной линии электропередачи / А. С. Засыпкин, А. Н. Щуров, А. С. Засыпкин (мл.), А. Д.

Тетерин // Известия ВУЗов. Северо-Кавказский регион. Технические науки. – 2015. – № 2. – с. 58-63. DOI: 10.17213/0321-2653-2015-2-58-63.

71. Бургсдорф, В. В. О Физике гололедно-изморозевых явлений / В. В. Бургсдорф // Труды ГГО. – 1947. – № 3 (65). – С. 3-11.

72. Мещерякова, Т. П. Проектирование систем защиты самолетов и вертолетов : учебное пособие для вузов / Т. П. Мещерякова. – М. : Машиностроение, 1977. – 232 с.

73. Алексеенко, С. В. Исследование замерзания переохлажденной капли воды / С. В. Алексеенко, А. А. Приходько // Материалы Шестнадцатой Международной школы-семинара «Модели и методы аэродинамики» : Сб. научн. тр. – Евпатория : Изд-во Центральный аэрогидродинамический институт им. профессора Н. Е. Жуковского (Жуковский). – 2016. – С. 10-12.

74. Mishchenko, L. Design of Ice-free Nanostructured Surfaces Based on Repulsion of Impacting Water Droplets / L. Mishchenko, B. Hatton, V. Bahadur et al. // American Chemical Society. – 2010. – 4 (12). – P. 7699-7707. DOI: 10.1021/nn102557p.

75. Экспериментальные и теоретические исследования процессов обледенения наномодифицированных супергидрофобных и обычных поверхностей / Э. С. Гринац, А. Б. Миллер, Ю. Ф. Потапов, А. Л. Стасенко // Вестник МГОУ. Серия: Физика-математика. – 2013. – № 3. – С. 84-92.

76. Ковалев, Н. А. Прикладная механика : учебник для инж.-техн. и инж.-экон. спец. вузов / Н. А. Ковалев. – М. : Изд-во Высш. школа, 1982. – 400 с.

77. Беленя, Е. И. Металлические конструкции. Специальный курс : учеб. пособие для вузов / Е. И. Беленя, Н. Н. Стрелецкий, Г. С. Ведеников [и др.] ; под общ. ред. Е. И. Беленя. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Стройиздат, 1991. – 687 с.

78. Григолюк, Э. И. Неклассические теории стержней, пластин и оболочек / Э. И. Григолюк, И. Т. Селезов. – М. : ВИНТИ, 1973.

79. Вибрации в технике. Т.1. : Колебания линейных систем. – 2-е изд., испр. и доп. / Под ред. Болотина В. В. – М. : Машиностроение, 1999. – 504 с.

80. Ерофеев, В. И. Волны в стержнях. Дисперсия. Диссипация. Нелинейность / В. И. Ерофеев, В. В. Кажаяев, Н. П. Семерикова. – М. : Физматлит, 2002. – 208 с.

81. Исакович, М. А. Общая акустика / М. А. Исакович. – М. : Наука, 1973. – 496 с.
82. Кольский, Г. Волны напряжения в твердых телах / Г. Кольский. М. : Изд-во ИЛ, 1955. – 194 с.
83. Таран, В. А. Расчетно-экспериментальное исследование несущей способности звукоизолирующей пластинчато-сетчатой панели : дис. ... канд. техн. наук : 01.02.06 / Владимир Алексеевич Таран. – Омск, 2016. – 173 с.
84. Аппель, П. Теоретическая механика. Т. 1. Статика. Динамика точки / П. Аппель. – М. : гос. Изд-во физ.-мат. лит., 1960. – 515 с.
85. Москалев, Н. С. К расчету арок и жестких нитей на смещение опор / Н. С. Москалев, Б. М. Курбанов // Строительная механика и расчет сооружений. – 1978. – № 5. – С. 67-68.
86. 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.
87. Липницкий, М. Е. О применении висячих конструкций в промышленном строительстве / М. Е. Липницкий // Промышленное строительство. – 1962. – № 5. – С. 23-26.
88. Масленикова, Ю. И. К расчету гибких нитей и вантовых покрытий : дис. ... канд. техн. наук : 05.00.00 / Юлия Ивановна Масленикова. – Комсомольск-на-Амуре, 1971. – 145 с.
89. Червяков, А. В. Расчет предварительно напряженных двухпоясных висячих систем методом начальных параметров / А. В. Червяков, Ю. В. Ким, В. И. Кононович // Висячие конструкции покрытий и мостов : межвуз. сб. – Воронеж : Изд-во ВГУ. – 1988. – С. 95-101.
90. Прочность и разрушение при кратковременных нагрузках : учебное пособие / Х. А. Рахматулин, Е. И. Шемякин, Ю. А. Демьянов, А. В. Звягин. – М. : Изд-во Университетская книга; Логос, 2008. – 624 с.

91. Пустовой, Н. В. Применение геометрически нелинейных уравнений стержня к расчету статики и динамики тросов. Ч. 2 / Н. В. Пустовой, В. Е. Левин, Д. А. Красноруцкий // Научный вестник НГТУ. – 2012. – № 2 (47). – С. 127-136.

92. Тарасов, Д. А. Математическое моделирование напряженно-деформированного состояния стальных канатов при действии поперечных статических и ударных нагрузок : дис. ... канд. техн. наук : 05.13.18 / Денис Александрович Тарасов. – Пенза, 2016. – 146 с.

93. Малашин, А. А. Взаимовлияние волновых и колебательных процессов в предварительно напряженных элементах и системах : дис. ... докт. физ-мат. наук : 01.02.04 / Алексей Анатольевич Малашин. – Москва, 2011. – 215 с.

94. Мошкин, В. И. Импульсные линейные электромагнитные двигатели : монография / В. И. Мошкин, В. Ю. Нейман, Г. Г. Угаров. – Курган : Изд-во КГУ, 2010. – с. 220.

95. Карпенко, Л. Н. Быстродействующие электродинамические отключающие устройства / Л. Н. Карпенко. – Л. : Изд-во «Энергия», 1973. – с. 160.

96. Тютюкин, В. А. Разработка электромеханических магнитно-импульсных устройств для электрофизических установок и промышленных технологий : дис. ... докт. техн. наук : 05.09.01 / Владимир Александрович Тютюкин. – Истра, 2004. – 225 с.

97. Татмышевский, К. В. Магнитно-импульсные метательные установки для проведения ударных испытаний взрывательных устройств боеприпасов и средств бронезащиты / К. В. Татмышевский, М. Л. Семенович, С. А. Козлов // Известия РАН. – 2005. – № 4. – С. 22-31.

98. Болух, В. Ф. Пути совершенствования линейных электромеханических преобразователей импульсного действия / В. Ф. Болух // Електротехніка і Електромеханіка. – 2006. – № 5. – С. 14-21.

99. Болух, В. Ф. Исследование линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя при различных схемах питания индуктора / В. Ф. Болух, А. И. Кочерга, И. С. Щукин // Електротехніка і Електромеханіка. – 2018. – №1. – С. 21-28.

100. Improved performance of linear induction launchers / A. Balikci, Z. Zabar, L. Birenbaum, D. Czarkowski // IEEE Transactions on Magnetics. – 2005. – No. 1 (41). – P. 171-175. DOI: 10.1109/TMAG.2004.839283.

101. McNab, I. R. Launch to space with an electromagnetic railgun / I. R. McNab // IEEE Transactions on Magnetics. – 2003. – No. 1 (39). – P. 295-304.

102. Карпухин, В. Ф. Особенности схемы встречного метания заготовок при магнитно-импульсной сварке / В. Ф. Карпухин // Материалы Международной научно-технической конференции «Магнитно-импульсная обработка материалов. Пути совершенствования и развития» : Сб. научн. тр. – Самара: Изд-во учеб. лит. – 2007. – С. 99-103.

103. Болюх, В. Ф. Эффективность линейных импульсных электромеханических преобразователей, предназначенных для создания ударных нагрузок и высоких скоростей / В. Ф. Болюх, С. В. Олексенко, И. С. Щукин // Электротехніка і Електромеханіка. – 2015. – № 3. – С. 31-40.

104. Семенович, М. Л. Магнитно-импульсный (индукционно-динамический) высокоскоростной привод для устройств испытания изделий на ударное воздействие : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Мария Львовна Семенович. – Владимир, 2003. – 156 с.

105. 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.

106. Habibi, H. A dual de-icing system for wind turbine blades combining high-power ultrasonic guided waves and low-frequency forced vibrations / H. Habibi, L. Cheng, H. Zheng et al. // Renewable Energy. – 2015. – No. 83. – P. 859-870.

107. Space applications for contactless coilguns / R. J. Lipinski, S. Beard, J. Boyes et al. // IEEE Transactions on Magnetics. – 1993. – No. 1 (29). – pp. 691-695. DOI: 10.1109/20.195659.

108. Chemerys, V. T. Prospectives of new coilgun design development / V. T. Chemerys, V. F. Bolyukh // Artillery and small arms. – 2008. – No. 3. – P. 44-52.

109. Татмышевский, К. В. Магнитно-импульсные метательные средства поражения для систем активной защиты объектов особой важности / К. В. Татмышевский, С. Н. Марычев, С. А. Козлов // Современные технологии безопасности. – 2005. – № 4. – С. 8-11.

110. Косцов, Э. Г. Микроэлектромеханический ускоритель твердотельных объектов / Э. Г. Косцов // Автометрия. – 2012. – № 4 (48). – С. 93-103.

111. 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.

112. 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.

113. 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.

114. Калантаров, П. Л. Расчет индуктивностей : справочная книга / П. Л. Калантаров, Л. А. Цейтлин. – 3-е изд. – Л. : Изд-во Энергоатомиздат, 1986. – с. 488.

115. Андреев, А. Н. Индукционное ускорение проводников и высокоскоростной привод / А. Н. Андреев, В. Н. Бондалетов // Электричество. – 1973. – № 10. – С. 36-41.

116. Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. Т. 2 / К. С. Демирчян, Л. Р. Нейман, Н. В. Коровкин, В. Л. Чечурин. – 7-е изд. – СПб : Изд-во Питер, 2003. – 576 с.

117. Зарудский, Г. К. Линия электропередачи [Электронный ресурс] / Г. К. Зарудский // Большая российская энциклопедия. Том 17. – 2010. – Режим доступа: [https://bigenc.ru/technology\\_and\\_technique/text/2146410](https://bigenc.ru/technology_and_technique/text/2146410).

118. Мельников, А. А. Повышение надежности воздушных линий электропередачи – эффективные решения с применением спиральной арматуры АО «Электросетьстройпроект» [Электронный ресурс] / А. А. Мельников, С. В. Рыжов // Материалы Всероссийской научной конференции «Пути повышения надежности, эффективности и безопасности энергетического производства» : Сб. научн. тр. – Дивноморское. – 2017. – Режим доступа: <http://kka-rntoee.ru/reports/i13>.

119. РД 34.20.182-90. Методические указания по типовой защите от вибрации и субколебаний проводов и грозозащитных тросов воздушных линий электропередачи напряжением. – Введ. 1991-06-01. – Москва : АО ВНИИЭ, 1991. – 70 с.

120. 165.J. Chan, EPRI Transmission Line Reference Book: Wind-Induced conductor motion, Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, 2006.

121. 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-shemnogo-resheniya-ustroystva-dlya-preduprezhdeniya-obledeneniya-provodov-lep>.

122. Козлов, С. А. Магнитно-импульсная метательная установка для испытаний на ударные воздействия : дис. ... канд. техн. наук : 05.02.02 / Сергей Александрович Козлов. – Владимир, 2006. – 213 с.

123. Меркин, Д. Р. Введение в механику гибкой нити / Д. Р. Меркин. – М. : Изд-во Наука, 1980. – 240 с.

124. 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.

125. 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.

126. 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.

127. 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.

128. Смердин, А. Н. Совершенствование методики исследования волновых процессов в контактной подвеске на основе конечно-элементной модели / А. Н. Смердин, А. С. Голубков, В. А. Жданов // Известия Транссиба. – 2011. – № 1 (15). – С. 30-37.

129. Затылкин, А. В. Дискретная модель процесса распространения импульса смещения в упругом стержне постоянного сечения при торцевом ударе / А. В. Затылкин, Г. В. Таньков, Д. В. Ольхов // Вестник Пензенского государственного университета. – 2013. – № 4. – С. 79-85.

130. Бунзя, А. В. Разработка устройства удаления гололеда с двойного контактного провода импульсно-резонансным методом на основе управляемого преобразователя : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Бунзя Андрей Вадимович. – Екатеринбург, 2007. – 185 с.

131. Shabana, A. A. Three Dimensional Absolute Nodal Coordinate Formulation for Beam Elements: Theory / A. A. Shabana, R. Y. Yakoub // Journal of Mechanical Design. – 2001. – No. 4 (123). – P. 606-613. DOI: 10.1115/1.1410100.

132. Khude, N. N. Efficient simulation of flexible body systems with frictional contact/impact : Partial requirement for a doctorate degree in Mechanical Engineering / Naresh N. Khude. – Madison, 2015. – 152 p.

133. Иванов, А. MSC.Adams: теория и элементы виртуального конструирования и моделирования : учебное пособие / А. Иванов. – М. : Изд-во Московское представительство MSC.Software GmbH, 2003. – 97 с.

134. Матюхин, С. И. Форма капель жидкости, помещенных на твердую горизонтальную поверхность / С. И. Матюхин, К. Ю. Фроленков // Конденсированные среды и межфазные границы. – 2013. – № 3 (15). – С. 292-304.

135. Розина, Е. Ю. Капиллярно-вибрационное распыление жидкости / Е. Ю. Розина // Акустичний вісник. – 2002. – № 2 (5). – С. 43-53.

136. Чашечкин, Ю. Д. Трансформации перемычки в процессе отрыва капли / Ю. Д. Чашечкин, В. Е. Прохоров // Прикладная механика и техническая физика. – 2016. – № 3 (57). – С. 16-31.

137. Przemieniecki, J. S. Theory of matrix structural analysis / J. S. Przemieniecki. – New York : Publ. McGraw-Hill, 1968. – 468 p.

138. Kálmán, T. Dynamic behavior of iced cables subjected to mechanical shocks : Exigence partielle du doctorat en ingénierie / Tamás Kálmán. – Chicoutimi, 2007. – 196 p.

139. 164. Данилин, А. Н. Об оценках жесткостей проводов воздушных ЛЭП / А. Н. Данилин, Ю. Н. Карнет, Ю. В. Аносов // Известия ТулГУ. Технические науки. – 2015. – № 4. – С. 128-137.

140. Хргиан, А. Х. Физика атмосферы / А. Х. Хирган. – Л. : Гидрометеиздат, 1969. – 646 с.

141. Краткий справочник физико-химических величин / Под ред. А. А. Равделя и А. М. Пономаревой. – 10-е изд. – СПб.: Изд-во «Иван Федоров», 2003. – 240 с.

142. 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.

143. 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.

144. 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.

145. Клыков, И. И. Определение модуля Юнга из деформации растяжением : Метод. указания для выполнения лабораторной работы / И. И. Клыков : Рецензент В.Ф. Нявро. – Томск : Изд. дом ТГУ, 2014. – 16 с.

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

147. 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.

148. 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.

149. 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.

150. Седов, Л. И. Методы подобия и размерности в механике. – 8-е изд. / Л. И. Седов. – М. : Наука, 1977. – 440 с.

151. Линейные электромагнитные двигатели и приводы в импульсных процессах и технологиях / К. М. Усанов, В. И. Мошкин, В. А. Каргин, А. В. Волгин. – Курган : Изд-во Курганского гос. ун-та, 2015. – 202 с.

152. Исследование эффективности ускорения проводников в импульсном магнитном поле соленоида / В. Н. Бондалетов, Е. Н. Иванов, С. Р. Петров, В. А. Тютюкин // Прикладная механика и техническая физика. – 1983. – № 2. – С. 82-86.

153. Тютюкин, В. А. Исследование эффективности электромеханического преобразования энергии в индукционно-динамических системах с многослойными индукторами / В. А. Тютюкин // Проблемы технической электродинамики. Тезисы докладов. – Киев., 1979. – С. 252-253.

154. Болюх, В. Ф. Влияние числа радиальных разрезов ферромагнитного экрана на показатели линейного индукционно-динамического преобразователя / В. Ф. Болюх, С. В. Олексенко // Вісник НТУ «ХПІ». – 2015. – № 13 (1122). – С. 45-60.

155. Болюх, В. Ф. Схемно-конструктивные совершенствования ударных электромеханических преобразователей индукционного типа / В. Ф. Болюх, И. С. Щукин, // Електротехніка і Електромеханіка. – 2010. – №5. – С. 5-11.

156. Кнопфель, Г. Сверхсильные импульсные магнитные поля : пер. с англ. / Г. Кнопфель. – М. : Мир, 1972. – 391 с.

157. Болюх, В. Ф. Экспериментальные и теоретические исследования ударного электромеханического преобразователя индукционного типа с различными индукторами / В. Ф. Болюх, А. М. Марков, В. Ф. Лучук [и др.] // Електротехніка і Електромеханіка. – 2009. – № 5. – С. 17-24.

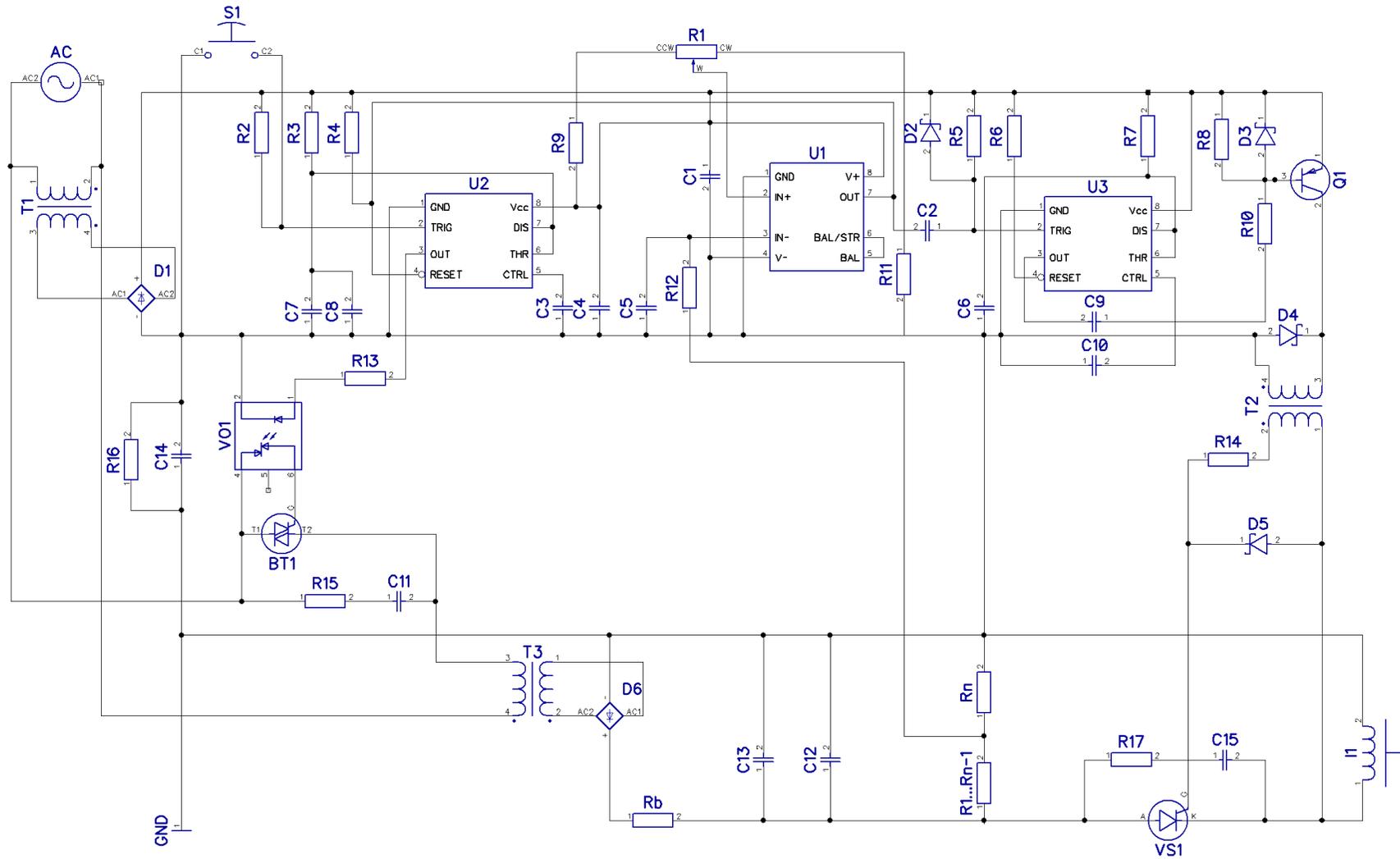
158. Бондалетов, В. Н. Индукционное ускорение проводников / В. Н. Бондалетов // Журнал технической физики. – 1967. – № 2 (37). – С. 280-287.

159. Болюх, В. Ф. Влияния формы и расположения якоря на эффективность индукционно-динамического двигателя с использованием 3D модели / В. Ф. Болюх, С. В. Олексенко, И. С. Щукин // Вісник НТУ «ХПІ». – 2013. – № 65 (1038). – С. 63-83.

160. Лившиц, А. Л. Импульсная электротехника / А. Л. Лившиц, М. Ш. Отто. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 351 с.

161. Болюх, В. Ф. Влияние параметров наружного экрана на эффективность индукционно-динамического преобразователя / В. Ф. Болюх, С. В. Олексенко // Інтегровані технології та енергозбереження. – 2014. – № 2. – С. 24-35.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А Принципиальная схема экспериментальной установки



**ПРИЛОЖЕНИЕ Б Документы на зарегистрированные объекты  
интеллектуальной собственности**

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



**СВИДЕТЕЛЬСТВО**  
о государственной регистрации программы для ЭВМ  
**№ 2020661945**

**Планирование уточняющего эксперимента**

Правообладатель: *Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО ИрГУПС) (RU)*

Автор: *Ратушняк Валентина Сергеевна (RU)*

Заявка № **2020618269**  
Дата поступления **27 июля 2020 г.**  
Дата государственной регистрации  
в Реестре программ для ЭВМ **05 октября 2020 г.**

Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности



*Г.П. Ивлиев* Г.П. Ивлиев

## РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2666754

СПОСОБ И УСТРОЙСТВО ДЛЯ УДАЛЕНИЯ НАЛЕДИ С  
ПРОВОДОВ ЛИНИЙ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ

Патентообладатель: *Общество с ограниченной ответственностью  
"научно-производственное предприятие "СибТрансНаука"  
(RU)*

Авторы: *Ратушняк Виктор Сергеевич (RU), Юрьев Анатолий  
Васильевич (RU), Ильин Евгений Сергеевич (RU), Трухина  
Ирина Сергеевна (RU), Ратушняк Валентина Сергеевна (RU)*

Заявка № 2017136405

Приоритет изобретения 16 октября 2017 г.

Дата государственной регистрации в

Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 12 сентября 2018 г.

Срок действия исключительного права

на изобретение истекает 16 октября 2037 г.



Руководитель Федеральной службы  
по интеллектуальной собственности

*Г.П. Ислюев* Г.П. Ислюев



количество необходимых устройств – 3 шт. стоимостью 30 000 руб. Что в сравнении с приобретением ВУПГ-14/1200 стоимостью 30 млн. руб. в 333 раза дешевле.

Внедрение решения предотвращения образования льда на основе линейного импульсно-индукционного электромеханического преобразователя (ЛИИЭП) приводит к значительному снижению повреждения проводов ЛЭП, связанному с отсутствием риска отжига, вызываемого плавкой гололеда. Энергозатраты при использовании устройства на основе ЛИИЭП в сравнении с тепловым методом на участке ВЛ 110 кВ ПС «Центр» 220 кВ – ПС «Слобода весны» 110 кВ снижается за счет низкого энергопотребления единицы устройства, составляющего 0,008 кВт\*ч в сравнении с потреблением ВУПГ-14/1200 16,8 МВт\*ч.

Ожидаемый годовой экономический эффект от внедрения решения предотвращения образования льда на основе ЛИИЭП составляет 671999,52 р. с учетом длительности гололедоопасной обстановки равной 10 часов в год.

Старший мастер ООО «РСК сети»



Д. В. Дворков

## ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«Иркутский государственный университет путей сообщения»

**Красноярский институт железнодорожного транспорта**

– филиал Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения  
высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»  
(КРИЖТ ИрГУПС)

УТВЕРЖДАЮ  
И.о. директора КРИЖТ ИрГУПС  
\_\_\_\_\_ А.И. Орленко  
\_\_\_\_\_ 2021 г.



А К Т

11.02.2021№ 8

О внедрении и использовании результатов  
научного проекта, выполненного  
Ратушняк Валентиной Сергеевной.

Настоящим актом подтверждается, что основные результаты научного проекта №19-38-90188 «Формирование научных основ и принципов управления процессами очистки проводов ЛЭП от гололедных отложений короткими механическими ударами», получившего поддержку РФФИ, выполненного Ратушняк Валентиной Сергеевной, используются в учебном процессе кафедры «Системы обеспечения движения поездов» (СОД) КРИЖТ ИрГУПС на основании заседания кафедры СОД, протокол № 6 от 03.02.2021:

– при проведении лекционных и практических занятий по дисциплинам «Математическое моделирование систем и процессов», «Электроника», «Теоретические основы электротехники», «Электромагнитная совместимость и средства защиты», «Электротехническое материаловедение», «Контактные сети и линии электропередач», «Автоматизация систем электроснабжения», «Сооружение, монтаж и эксплуатация устройств электроснабжения», «Компьютерное проектирование и моделирование систем электроснабжения», «Электрические сети и системы», «Энергосбережение в системах электроснабжения» для студентов факультета Очное обучение, обучающихся по направлению подготовки 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов специализации «Электроснабжение железных дорог»;

– при проведении курсовых и выпускных квалификационных работ, а также в научно-исследовательской работе студентов.

Для сопровождения учебного процесса используются созданные при непосредственном участии автора расчетные и математические модели, результаты теоретических и экспериментальных исследований, численные результаты и их интерпретация, а также созданная физическая модель.

## Эффект внедрения:

Научно-технические результаты по проблеме гололедных аварий и разработке устройства для предупреждения гололедообразования имеют важное значение для детального изучения этой проблемы и подходов к ее решению. Это способствует повышению качества подготовки обучающихся по направлению подготовки 23.05.05 Системы обеспечения движения поездов специализации «Электроснабжение железных дорог».

Зам. директора по информатизации и ИР,  
канд. техн. наук, доцент



Е.С. Ильин

Зам. директора по учебной работе,  
канд. техн. наук, доцент



Е.И. Михайлова

Декан факультета «Очное обучение»,  
канд. экон. наук, доцент



А.С. Данилова

Заведующий кафедрой «СОД»  
канд. техн. наук, доцент



О.В. Колмаков

Соискатель ученой степени



В.С. Ратушняк