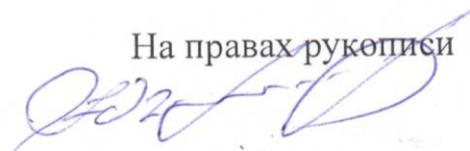


Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
(ФГБОУ ВО УрГУПС)

На правах рукописи



Кочунов Юрий Александрович

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА
ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ В СЕТЯХ НЕТЯГОВЫХ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ 6–10 кВ**

Специальность 05.22.07 – Подвижной состав железных дорог,
тяга поездов и электрификация (технические науки)

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Аржанников Борис Алексеевич

Екатеринбург – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	6
Глава 1 Направление совершенствования поддерживающих конструкций воздушной линии электропередачи устройств СЦБ и линии продольного электроснабжения.....	13
1.1. Общие сведения о поддерживающих конструкциях воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.....	13
1.2. Анализ технического состояния поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ в период 2003 – 2014 годы	22
1.3. Анализ направлений научных исследований в области применения полимерных материалов на железнодорожном транспорте.....	33
1.4. Анализ свойств и характеристик полимерных материалов для использования при разработке поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.....	34
1.5 Разработка схемных решений поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ с учетом особенностей полимерных материалов.....	44
1.6 Разработка требований и критериев оценки полимерного кронштейна воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.....	45
Выводы по первой главе.....	46
Глава 2 Разработка методик расчета механической и электрической прочности полимерного кронштейна.....	48
2.1 Разработка методики расчета механической прочности полимерного кронштейна.....	49

2.1.1	Анализ особенностей и направления решений при разработке методики расчета механической прочности полимерного кронштейна.....	49
2.1.2	Определение механической прочности полимерного кронштейна при влиянии статических и динамических нагрузок.....	50
2.1.3	Исследование прочностных характеристик полимерных кронштейнов в гололедных и ветровых районах.....	77
2.2	Разработка методики расчета электрической прочности полимерного кронштейна.....	79
2.2.1	Анализ особенностей и направления решений при разработке методики расчета электрической прочности полимерного кронштейна.....	79
2.2.2	Определение зависимости электрической прочности полимерного кронштейна от геометрических характеристик и степени загрязнения.....	85
2.2.3	Определение численных значений удельной поверхностной проводимости при изменении толщины и концентрации загрязнения изоляции.....	91
2.2.4	Вероятностная оценка перекрытия полимерного кронштейна, стеклянных и фарфоровых изоляторов воздушной ЛЭП при грозовых перенапряжениях.....	105
	Выводы по второй главе.....	107
Глава 3	Экспериментальные исследования полимерного кронштейна.....	109
3.1	Разработка основных этапов по созданию полимерного кронштейна.....	109
3.2	Разработка методики и проведение экспериментальных исследований механической прочности полимерного кронштейна.	111
3.3	Разработка методики и проведение экспериментальных исследований электрической прочности полимерного кронштейна	

	в загрязненном и увлажненном состоянии.....	115
3.4	Разработка методики и проведение экспериментальных исследований термомеханической прочности полимерного кронштейна.....	128
3.5	Оценка опытной эксплуатации полимерного кронштейна в воздушной ЛЭП продольного электроснабжения.....	138
	Выводы по третьей главе.....	140
Глава 4	Технико-экономическая эффективность применения полимерных кронштейнов в воздушных ЛЭП 6–10 кВ электрифицированных железных дорог.....	142
4.1	Основные положения технико-экономического обоснования применения полимерного кронштейна.....	142
4.2	Требования к безопасности.....	147
	Выводы по четвертой главе.....	148
	ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	149
	СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	151
ПРИЛОЖЕНИЕ А	Протоколы испытания изоляции	168
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	«Кронштейны из полимерных материалов» Рабочая документация № 3320.....	171
ПРИЛОЖЕНИЕ В	Протокол № 1 от 24.03.2014 г. Результаты предварительных испытаний кронштейнов полимерных по проекту № 3320.....	176
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	Протокол № 2 от 31.07.2014 г. Результаты предварительных испытаний полимерного кронштейна СИП-3 по проекту № 3320.....	182
ПРИЛОЖЕНИЕ Д	Программа и протокол электрических испытаний полимерного кронштейна.....	187
ПРИЛОЖЕНИЕ Е	Программа и протокол термомеханических испытаний полимерного кронштейна.....	207

ПРИЛОЖЕНИЕ Ж	Информационное письмо «Об опытной эксплуатации полимерного кронштейна».....	225
ПРИЛОЖЕНИЕ И	АКТ ввода в опытную эксплуатацию полимерного кронштейна КПСИП-3	227
ПРИЛОЖЕНИЕ К	Справка о практическом использовании научных результатов диссертационной работы.....	229
ПРИЛОЖЕНИЕ Л	АКТЫ о проведении осмотров состояния полимерного кронштейна КПСИП-3 в опытной эксплуатации.....	231

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. На основании Транспортной стратегии Российской Федерации на период до 2030 г. приоритетным направлением деятельности хозяйства электрификации и электроснабжения – Управления электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры филиала ОАО «РЖД» – является внедрение малообслуживаемых устройств электроснабжения с длительным сроком эксплуатации и низкими приведенными затратами [1–3]. При этом особое внимание уделяется поддерживающим конструкциям (кронштейнам и изоляторам) воздушной линии электропередачи (ВЛЭП) напряжением 6–10 кВ устройств сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ) и линии продольного электроснабжения (ПЭ) питающих нетяговые потребители. Несмотря на значительный объем проведенных технических и организационных мероприятий по совершенствованию устройств электроснабжения железных дорог и методов их обслуживания, позволяющих снизить повреждаемость в несколько раз, надежность этих систем недостаточно высока. Это обусловлено тем, что известные научные и технические решения рассматривают кронштейны и изоляторы как отдельные элементы системы, имеющие свои нормы эксплуатации, методы диагностирования, срок службы. Отказ одного из элементов (кронштейна, изоляторов, арматуры и т. д.) ведет к отказу поддерживающей конструкции и всей воздушной линии электропередачи [4]. Одним из решений по повышению надежности ВЛЭП является использование при создании кронштейнов современных полимерных материалов. Однако вопрос о возможном применении полимерных материалов как альтернативы металлу с учетом специфики их нагружения изучен недостаточно. Поэтому создание нового полимерного кронштейна с учетом разработки принципов анализа механической и электрической прочности, позво-

ляющих оценить его работоспособность в процессе эксплуатации, является **актуальной задачей.**

Область исследования: электроснабжение нетяговых железнодорожных потребителей.

Объект исследования: полимерный кронштейн для самонесущих изолированных проводов КПСИП-3.

Предмет исследования: параметры механической и электрической прочности полимерного кронштейна КПСИП-3.

Степень разработанности темы исследования. Работы в области исследования новых поддерживающих конструкций устройств электроснабжения на железнодорожном транспорте велись в научно-исследовательских центрах: ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ», ОАО ЦНИИС, ПКБ ЦЭ ОАО «РЖД», ВНИИЖТ, ЗАО «ФОРАТЕК ЭнергоТрансСтрой», ЗАО «Универсальные контактные сети», ОАО «ФСК ЕЭС», РОСНАНО, ЗАО «ХК «Композит» и др, отражены в трудах: Б. А. Аржанникова, В. М. Рущкого, С. М. Куценко, А. Г. Галкина, Х. Т. Туранова, Г. Н. Александрова, В. Д. Потапова, Ю. И. Горошкова, А. М. Лукьянова, Ю. Н. Шумилова, З. С. Бакалова, Л. Г. Помакова, А. А. Федотова, С. А. Колесникова, Р. А. Хорошевского, В. А. Кравченко, С. Н. Науменко, Ю. Г. Чепелева, В. М. Долдина и др. Труды ученых направлены на изучение работы изоляции наружной установки при различных режимах, а также на исследования и разработку полимерных изоляторов, консолей, кронштейнов волновода, но при этом не рассмотрено применение полимерных материалов для изготовления кронштейнов воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

Целью диссертационной работы является разработка и исследования полимерного кронштейна с обоснованием механических и электрических методов расчета нормативов допуска в теоретических и практических решениях.

Задачи исследования:

1. Провести анализ технического состояния и отказов поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ в про-

цессе эксплуатации на основании статистических данных и теоретических исследований.

2. Провести оценку механических и электрических параметров стеклопластика с анализом возможного его применения для изготовления поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Определение требований, которым должен отвечать полимерный кронштейн.

3. Разработать методику расчета механической прочности полимерного кронштейна, позволяющие адаптировать соотношения прогиба и максимального напряжения в конструкции при изменении статических и динамических нагрузок.

4. Определить направления анализа электрической прочности полимерного кронштейна, позволяющие при изменении геометрических параметров оценить 50 %-ное напряжение в зависимости от удельной поверхностной проводимости, применить результаты исследования в инженерной практике.

5. Разработать методику расчета численных значений удельной поверхностной проводимости, позволяющую дать вероятностную оценку работоспособности изоляционных конструкции от воздействия атмосферных загрязнений.

6. Определить вероятность перекрытия изоляции при грозовых перенапряжениях.

7. Разработать методику и программы проведения экспериментальных и эксплуатационных испытаний полимерного кронштейна.

Научная новизна диссертационной работы направлена на разработку новых инженерных и методических решений при конструировании и введении в эксплуатацию новой конструкции – полимерного кронштейна воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ – и состоит из следующих основных положений:

1. Определены и научно обоснованы основные факторы, приводящие к отказам поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

2. На основе теоретических и практических исследований определены требования, которым должен отвечать полимерный кронштейн для трехфазной воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

3. Для предлагаемой конструкции полимерного кронштейна, разработана методика расчета механической прочности полимерного кронштейна, позволяющая оценить прогиб и эквивалентное динамическое напряжение в различных ветровых и гололедных районах.

4. Определены и научно обоснованы геометрические параметры полимерного кронштейна позволяющие, обеспечить его электрическую прочность в районах различных по степени загрязнения.

5. Разработана методика расчета численных значений удельной поверхностной проводимости, позволяющая дать вероятностную оценку работоспособности полимерного кронштейна в различных зонах степени загрязнения.

6. На основании экспериментальных исследований определена вероятность перекрытия полимерного кронштейна разрядом молнии.

7. Разработана методика проведения экспериментальных и эксплуатационных испытаний полимерного кронштейна с учетом особенностей механической и электрической прочности.

Теоретическая и практическая значимость работы

1. Из статистического анализа и по результатам проведенных теоретических исследований определено, что применение полимерных поддерживающих конструкций позволит сократить количество отказов с 10 до 4 % от общего числа нарушений нормальной работы устройств СЦБ и ПЭ.

2. По проведенным исследованиям определено, что стеклопластик профильный электроизоляционный СПП-ЭИ(Н) обладает необходимыми электромеханическими свойствами и может быть использован для изготовления поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Определены требования, которым должен отвечать полимерный кронштейн.

3. Разработанная методика расчета механической прочности позволила определить геометрические размеры полимерного кронштейна, диаметры траверсы и тяг, точки крепления тяг к траверсе с учетом требований прогиба и эквивалентного динамического напряжения.

4. Разработанные методики расчета электрической прочности позволили определить область применения полимерного кронштейна в соответствии с требованиями нормативных документов.

5. Результаты, полученные на основании разработанных методик расчета механической и электрической прочности, использованы при разработке рабочей документации № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов».

6. По результатам проведенных теоретических и практических исследований полимерный кронштейн КПСИП-3 рекомендован к опытной эксплуатации.

7. Эксплуатация полимерных кронштейнов позволит перейти к обслуживанию воздушных линий по техническому состоянию, что приведет к снижению капитальных и эксплуатационных расходов хозяйств электрификации и электроснабжения – филиалов ОАО «РЖД».

8. Поддерживающие конструкции, разработанные по результатам диссертационной работы, могут быть использованы при строительстве новых и модернизации существующих воздушных линий электропередачи напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

Методология и методы исследования. В основу работы положены теоретические и практические исследования. Теоретические исследования проведены с использованием программ *SolidWorks*, «*POLUS v.2.1.1*» и программы моделирования мультифизических процессов *Comsol Multiphysics*, положений: теории вероятности, математической статистики и метода конечных элементов. Экспериментальные исследования проведены на реальном полимерном кронштейне в научно-исследовательском и испытательном центрах, а также в полигонных условиях на путях общего пользования ОАО «РЖД».

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты анализа технического состояния и отказов поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ на основании статистических данных и теоретических исследований.

2. Теоретические и практические исследования параметров стеклопластика, подтверждающие его использование для изготовления поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Требования, которым должен отвечать полимерный кронштейн.

3. Методика расчета механической прочности полимерного кронштейна, позволяющая определить геометрические размеры, при которых механическая прочность кронштейна будет обеспечена.

4. Методика определения возможности применения полимерного кронштейна для различных районов по степени загрязнения.

5. Методика расчета численных значений удельной поверхностной проводимости, позволяющая дать вероятностную оценку работоспособности полимерного кронштейна в различных зонах степени загрязнения.

6. Результаты определения вероятности перекрытия изоляции при грозовых перенапряжениях.

7. Результаты экспериментальных и эксплуатационных испытаний.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность научных положений диссертационной работы подтверждается сходимостью результатов теоретических и практических исследований, а также подтверждается актом внедрения в опытную эксплуатацию на действующей воздушной ЛЭП.

Основные результаты работы докладывались и обсуждались на конференциях: научно-практическая конференция «Современное оборудование и системы диагностики в электроэнергетике» (УрГУПС, Екатеринбург, 2012); Всероссийская конференция, посвященная 135-летию Свердловской железной дороги (УрГУПС, Екатеринбург, 2013); региональная научно-практической конференция «Полигонная технология вождения поездов весом 8–9 тысяч тонн на направлении Кузбасс –

Северо-Запад» (УрГУПС, Екатеринбург, 2015), международная научно-практическая конференция «Транспорт – 2015» (РГУПС, Ростов-на-Дону 2015); VIII международный симпозиум «Эльтранс – 2015» (ПГУПС, Санкт-Петербург, 2015); научно-технический совет Центральной дирекции инфраструктуры филиала ОАО «РЖД» «Диагностика оборудования устройств электроснабжения» (Екатеринбург, 2015).

Основные положения диссертации доложены на расширенных заседаниях кафедры «Электроснабжение транспорта» (УрГУПС, Екатеринбург, 2014, 2015, 2016), научном семинаре кафедры «Автоматизированные системы электроснабжения» (РГУПС, Ростов-на-Дону, 2015).

Реализация и внедрение результатов работы. Результаты теоретических и эмпирических исследований использованы при проектировании и разработке полимерного кронштейна КПСИП-3, что подтверждается оформлением рабочей документации № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов», справкой о практическом использовании научных результатов, а также актом внедрения в опытную эксплуатацию.

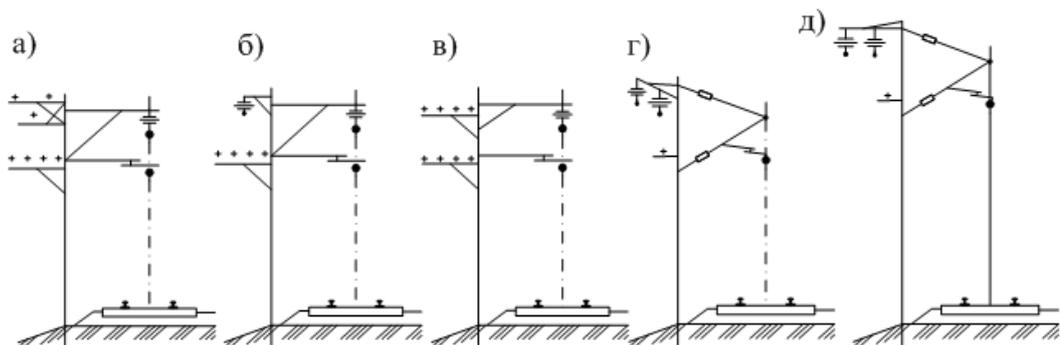
Публикации. Основные положения диссертационной работы и научные результаты отражены в 7 печатных работах, в том числе в 7 статьях в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, в патенте на полезную модель.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложений. Работа представлена на 235 страницах, содержит 167 страниц основного текста, 101 рисунок, 33 таблицы и 10 приложений на 67 страницах, 158 наименования библиографического списка.

1 НАПРАВЛЕНИЕ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ПОДДЕРЖИВАЮЩИХ КОНСТРУКЦИЙ ВОЗДУШНОЙ ЛИНИИ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ УСТРОЙСТВ СЦБ И ЛИНИИ ПРОДОЛЬНОГО ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ

1.1 Общие сведения о поддерживающих конструкциях воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ

На опорах контактной сети (КС), кроме проводов контактной подвески, располагают провода усиливающих, питающих и отсасывающих линий, а также провода обратного тока, групповых заземлений и дистанционного управления разъединителями, волновые линии поездной радиосвязи, провода громкоговорящей станционной связи, провода линий освещения, воздушные линии (ВЛ) продольного электроснабжения напряжением 6–10 кВ и линии два провода-рельс (ДПР). Провода ВЛ располагают, как правило, с полевой стороны опоры (рисунок 1.1) [5, 6].



а – ВЛ напряжением 6–10 кВ; б – усиливающих, питающих и отсасывающих линий; в – ВЛ напряжением до 1 кВ; г, д – ВЛ напряжением 25 кВ

Рисунок 1.1 – Расположение проводов на опорах контактной сети

Как показано на рисунке 1.1, для различных ВЛ используются соответствующие кронштейны. Кронштейн (от нем. Kragstein) – консольная опорная деталь (конструкция) для крепления других деталей или узлов машин (сооружений) к стене, стойке (колонне) и т. п. [7].

Типы кронштейнов можно представить в виде схемы (рисунок 1.2), в которой они подразделяются по способу применения (тип линии), по материалу изготовления, по напряжению, по радиусу кривизны пути и по применяемым изоляторам [5, 6, 8–28].



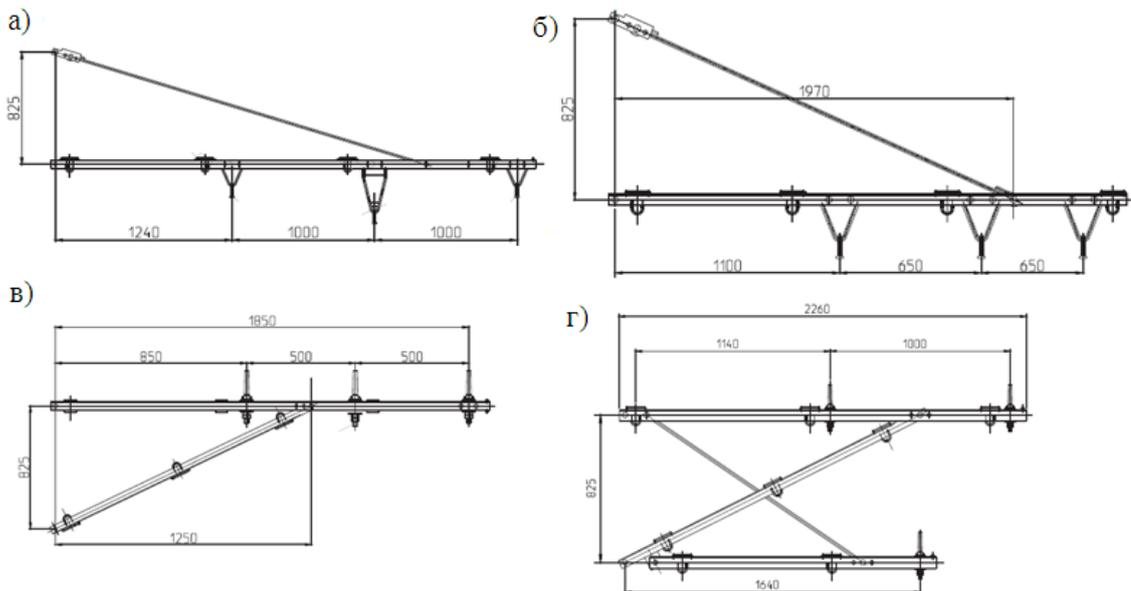
Рисунок 1.2 – Типы кронштейнов

Одним из важных показателей работы системы электроснабжения является безотказное и бесперебойное электропитание тяговых и нетяговых потребителей. К таким объектам относятся устройства сигнализации, централизации и блокировки (СЦБ), питание которых осуществляется по ВЛ напряжением 6–10 кВ ос-

новного и резервного фидеров – линии продольного электроснабжения (ПЭ) на участках постоянного тока.

Для воздушных линий напряжением 6 и 10 кВ применяют как металлические, так и деревянные кронштейны, но при строительстве новых линий и капитальном ремонте существующих магистралей производят демонтаж деревянных кронштейнов и устанавливают металлические. В настоящее время в эксплуатации хозяйства электрификации и электроснабжения находятся около 2,2 млн кронштейнов ВЛ напряжением 6–10 кВ [5]. Кроме того, до 2030 года при строительстве новых линий будут введены в эксплуатацию около 100 тыс. кронштейнов для ВЛ напряжением 6–10 кВ, а при модернизации и реконструкции линий будут дополнительно введены в эксплуатацию около 25 тыс. кронштейнов ВЛ напряжением 6–10 кВ [5].

Металлические кронштейны представляют собой консольную многодетальную конструкцию, служащую для крепления проводов на вертикальной плоскости (опоре), выполненные в двух исполнениях: с подвесными (рисунок 1.3 а, б) и штыревыми (рисунок 1.3 в, г) изоляторами [5, 12, 13].



а) КВЛЦ-50; б) СИП-3п; в) СИП-3; г) М-2

Рисунок 1.3 – Металлические кронштейны

Механический принцип действия кронштейнов характеризуется как работа траверсы на изгиб, тяги на растяжение, подкоса на сжатие.

При превышении максимальных допустимых нагрузок в кронштейнах возникает пластическая деформация, вследствие которой возможны дефекты: изгиб штыря, излом штыря, излом крепления тяги к траверсе, повреждение узлов крепления кронштейна к опоре, а также повреждение антикоррозийного покрытия.

Для предотвращения нарушений нормальной работы кронштейнов применяют различные способы повышения их надежности путем диагностирования, а также применения дополнительных профилактических мероприятий направленных на улучшение механических свойств при воздействии агрессивной воздушной среды. Данная тематика рассмотрена в научных трудах: А. В. Фрайфельда, К. Г. Марквардта, Ю. И. Горошкова, Ю. В. Флинка, И. И. Власова, В. П. Михеева, В. М. Долдина, В. Е. Чекулаева, А. И. Зайцева, К. П. Крюкова, И. Г. Барга, Н. А. Шергуновой, Ю. Е. Григорьева, Ю. М. Денисова, А. И. Сергеева, В. Н. Яковлева, В. А. Кравченко, А. С. Зиленченко, Д. И. Федорова, В. П. Шурыгина, Л. А. Германа, П. И. Анастасиева, М. М. Каетановича, А. В. Ефимова, А. Г. Галкина и др., а также в трудах научно-исследовательских центров ПКБ ЦЭ ОАО «РЖД», «ВНИИЖТ», «ТЭЛП», ОАО «ЦНИИС», ЗАО «ФОРАТЕК ЭнергоТрансСтрой», ОАО «ФСК ЕЭС», ОАО «НТЦ Электроэнергетики», ЗАО «МЗВА», ООО «НИЛЕД-ТД», ЗАО «Универсальные контактные сети», «Трансэлектропроект»; ОАО «Люберецкий электромеханический завод» и др. Классификация диагностики и повышения надежности кронштейнов приведена на рисунке 1.4 [12–14, 29–50].

Как отмечалось ранее, на кронштейнах применяются подвесные (ПФ-70, ПС-70Е, ПСД-70Е) и штыревые изоляторы (ШФ-20Г; ШФ-20Г1; ШС-10Е), которые выполняются из фарфора и стекла. Изолятор – электротехническое устройство, предназначенное для электрической изоляции и механического крепления электроустановок или их отдельных частей, находящихся под разными электрическими потенциалами [51].

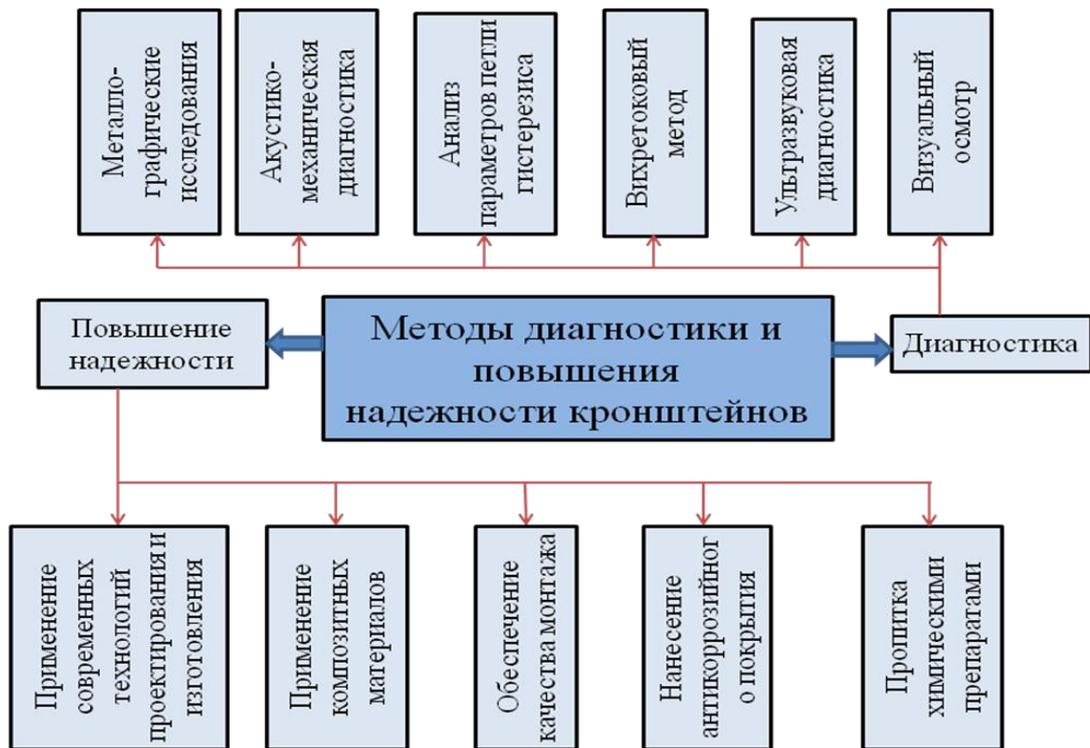


Рисунок 1.4 – Классификация диагностики и повышения надежности кронштейнов

Изоляторы должны удовлетворять требованиям в отношении электрической и механической прочности.

Электрическая прочность изоляторов определяется по разрядным характеристикам в загрязненном и увлажненном состоянии, а также по удельной эффективной длине пути утечки в зависимости от степени загрязнения в месте расположения электроустановки и ее номинального напряжения [52, 53].

Механическая прочность изолятора характеризуется допустимой, испытательной и разрушающей нагрузкой на растяжение и изгиб [54, 55, 56].

Подвесные изоляторы имеют резервирование (число изоляторов в гирлянде должно соответствовать требованиям «ПУТЭКС» [44]). При механическом повреждении происходит изменение изоляционных свойств изолятора или его пробой, что ведет к аварийным ситуациям, а также к нарушению графика движения поездов, особенно в грозовой период. Прозрачность стекла позволяет визуально определить дефекты изолятора в условиях эксплуатации [57]. У фарфоровых изо-

ляторов внутренние механические повреждения могут быть скрыты от невооруженного взгляда, поэтому некоторые методы диагностирования могут не зафиксировать дефект.

При осмотре подвесных фарфоровых изоляторов проверяют отсутствие повреждений изоляционных деталей, следов оплавления или перекрытия электрической дугой, наличие и правильность установки замков, сколов, трещин, нарушения целостности бетонной заделки, вследствие чего возможен срыв или изгиб пестика (рисунок 1.5) [12].

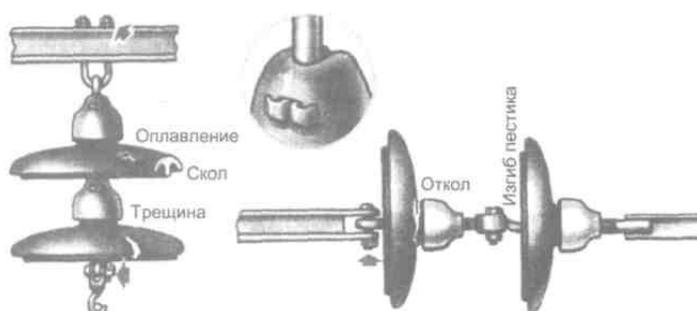


Рисунок 1.5 – Дефекты подвесных фарфоровых изоляторов

При увеличении разности высот подвеса проводов и при уменьшении длины пролета возникает вырывающая сила [58], которая приводит к срыву изолятора со штыря (рисунок 1.6), изгибу или излому штыря, в случае с деревянными кронштейнами – перекоосу или излому траверс (рисунки 1.7–1.9), обрыву вязки провода. Все эти дефекты являются нарушениями нормальной работы устройств электроснабжения ВЛ 6–10 кВ, они ведут к коротким замыканиям. Образовавшиеся токи утечки вызывают процесс коррозии опорно-поддерживающих металлических конструкций (рисунок 1.10) [5]. Качественная диагностика состояния электрической изоляции устройств электроснабжения железных дорог является важнейшей эксплуатационной задачей [59].



Рисунок 1.6 – Срыв изолятора



Рисунок 1.7 – Дефект крепления траверсы к опоре



Рисунок 1.8 – Дефект крепления траверсы к опоре



Рисунок 1.9 – Трещина деревянной траверсы



Рисунок 1.10 – Разрушение бетона от токов утечки

Учеными разработаны различные способы профилактических методов контроля изоляции, которые отражены в трудах: Руцкого В. М., Куценко С. М., Чайкиной Л. П. Плотникова Ю. И.; Ковалева А. О.; Хадсона Р.; Циреля Я. А., Полякова В. С., Василянского А. М., Герасимова В. П., Грачева В. Ф.; Овсянникова А. Г.; Косякова А. А., Базанова В. П., Спирина М. В., Сухопрудского Н. Д.; Радченко В. Д., Соколова С. Д., Сви П. М.; Каетановича М. М.; Харченко А. Ф.; Мерхалева С. Д., Соломоника Е. А.; Абрамова В. Д., Хомякова М. В. и др., а также в трудах научных коллективов: «НЦ ЭНАС»; ПКБ ЭЖД ОАО «РЖД»; ЗАО «ПАНАТЕСТ»; ОАО «ФСК ЕЗС» – НПО «Логотех» и др.

Методы диагностирования изоляторов приведены на рисунке 1.11 [55–83].

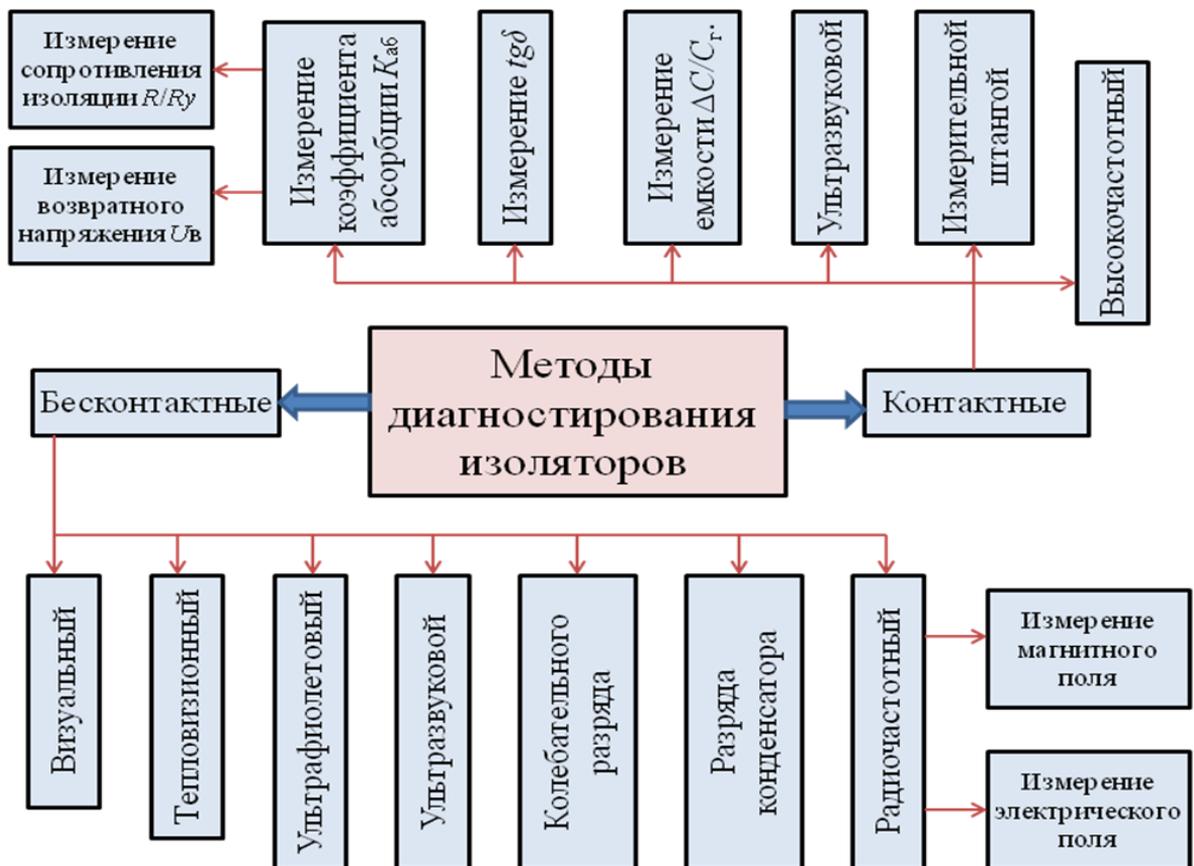


Рисунок 1.11 – Методы диагностирования изоляторов

Одной характерной особенностью всех испытаний, проводимых для устройств электроснабжения, является периодичность испытаний, задаваемая соответствующими типовыми нормами времени на техническое обслуживание и те-

кущий ремонт. Согласно этим нормативам, испытание изоляции следует производить периодически, через определенное время, в течение которого, как принято считать, изоляция может изменить свои характеристики и ее состояние ухудшится [59].

Несмотря на значительный объем проведенных технических и организационных мероприятий по совершенствованию элементов воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ, а также методов их обслуживания, позволяющих снизить повреждаемость в несколько раз, надежность этих конструкций недостаточно высока. Это обусловлено тем, что кронштейны и изоляторы рассматриваются как отдельные элементы, имеющие свои нормы эксплуатации, технические условия диагностирования, области отказов, срок службы.

Ежегодно в России и за рубежом разрабатываются новые методики увеличения надежности кронштейнов и изоляторов. Они выражены: в применении новых химических препаратов для пропитки древесины; в изготовлении антикоррозионного состава при цинковании металлических конструкций; в применении двойных вязок проводов; в использовании термоусадочных колпачков; во внесении дополнительных изменений в конструкции изоляторов и т. д. Все эти методики направлены отдельно для кронштейнов и для изоляторов, что, в свою очередь, ведет к дополнительным эксплуатационным затратам за счет технических мероприятий (осмотров и ремонтов), тем самым увеличивая приведенные затраты. Так, при сроке службы деревянного кронштейна 15 лет [44] и сроке службы изоляторов 50 лет [44], при капитальном ремонте производят демонтаж кронштейна и применяемых на нем изоляторов, сводя срок их службы к периоду эксплуатации кронштейна. Такая же ситуация и с металлическими кронштейнами, срок службы которых – 30–35 лет [44]. Рассмотрев существующие подходы к применению поддерживающих конструкций, следует, что поддерживающая конструкция воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ – это комплекс устройств (элементов), направленных на изоляцию и удерживание проводов на весу.

Следовательно, кронштейны (траверсы), изоляторы, вязки проводов, армирующие детали являются элементами поддерживающей конструкции и должны

иметь комплексную оценку работоспособности, так как выход из строя одного из элементов ведет к отказу всей конструкции.

1.2 Анализ технического состояния поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ в период 2003–2014 годы

Одним из показателей, характеризующих с практической стороны качество работы технических средств, является количество случаев нарушения их нормальной работы.

Важное место в работе приобретает системный анализ. Для сбора информации об отказах технических средств на основе графиков исполненного движения, используемых в перевозочном процессе, разработана комплексная автоматизированная система учета, контроля, устранения отказов технических средств и анализа их надежности «КАСАНТ».

Сочетание различных способов контроля и идентификации позволяет обеспечить необходимую достоверность и полноту исходной информации о подвижном составе, что качественно повышает эффективность информационно-управляющих систем за счет уменьшения негативного влияния «человеческого фактора» и позволяет перейти к прогнозным методам. Система «КАСАНТ» внедрена в промышленную эксплуатацию на всех 17-ти железных дорогах ОАО «РЖД» [84, 85].

Перспективное развитие ОАО «РЖД» требует от хозяйств электрификации и электроснабжения – филиалов ОАО «РЖД» – не только бесперебойного электропитания тяги поездов, повышения надежности устройств системы электроснабжения, но и обоснованного снижения расходов на строительство новых участков и содержание имеющегося имущества инфраструктуры. Данное технико-

экономическое направление может быть реализовано с переходом на эксплуатацию малообслуживаемых линий с длительным сроком эксплуатации и низкими приведенными затратами [1, 86].

В решении этого вопроса особое внимание уделяется поддерживающим конструкциям (кронштейнам и изоляторам) воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

В хозяйстве электрификации и электроснабжения находится в эксплуатации 108724,1 км воздушных и кабельных линий электроснабжения устройств СЦБ и нетяговых потребителей. В 2014 году количество отказов технических средств по электроснабжению устройств СЦБ и ПЭ составило 330 случаев. Основные причины нарушений нормальной работы электроснабжения устройств СЦБ и ПЭ, допущенные в хозяйстве электрификации и электроснабжения, в процентном соотношении в сравнении с 2013 г. представлены в таблице 1.1 и на рисунке 1.12 [86]. При этом следует отметить, что в статистическом анализе учтены лишь случаи, вызвавшие перерыв в движении поездов.

Основные факторы, повлиявшие на нормальную работоспособность электроснабжения устройств СЦБ и ПЭ в 2014 году, в процентном соотношении в сравнении с 2013 годом представлены на рисунке 1.13 [86].

Таблица 1.1 – Основные причины нарушений нормальной работы электроснабжения устройств СЦБ и ПЭ

Основные причины	Количество случаев в 2013 году	Количество случаев в 2014 году
Обрывы и схлестывание проводов	235	169
Перегорание предохранителей	81	55
Повреждения линейных трансформаторов	44	29
Повреждения кабелей и кабельных воронок	33	18
Повреждение оборудования пунктов питания	35	12
Повреждение изоляторов	25	16
Повреждение разъединителей	15	14
Излом кронштейнов и траверс	19	12
Повреждение опор	1	3
Повреждение разрядников	6	2
Итого	494	330

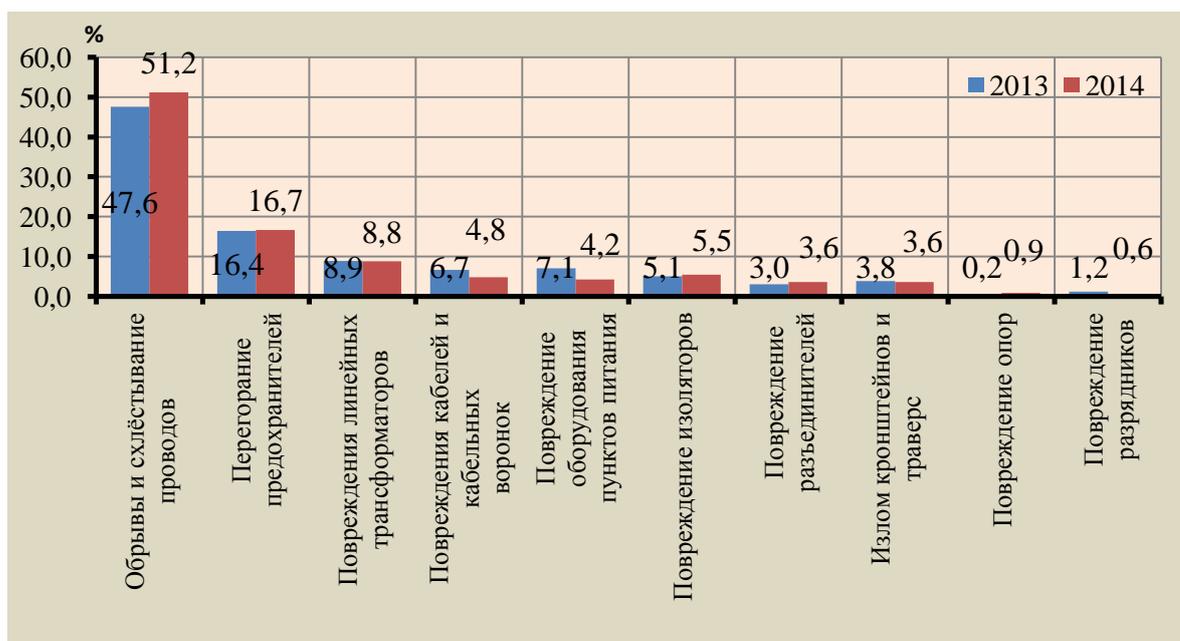


Рисунок 1.12 – Процентное соотношение основных причин нарушений нормальной работы электроснабжения устройств СЦБ и ПЭ, допущенные в хозяйстве электрификации и электроснабжения

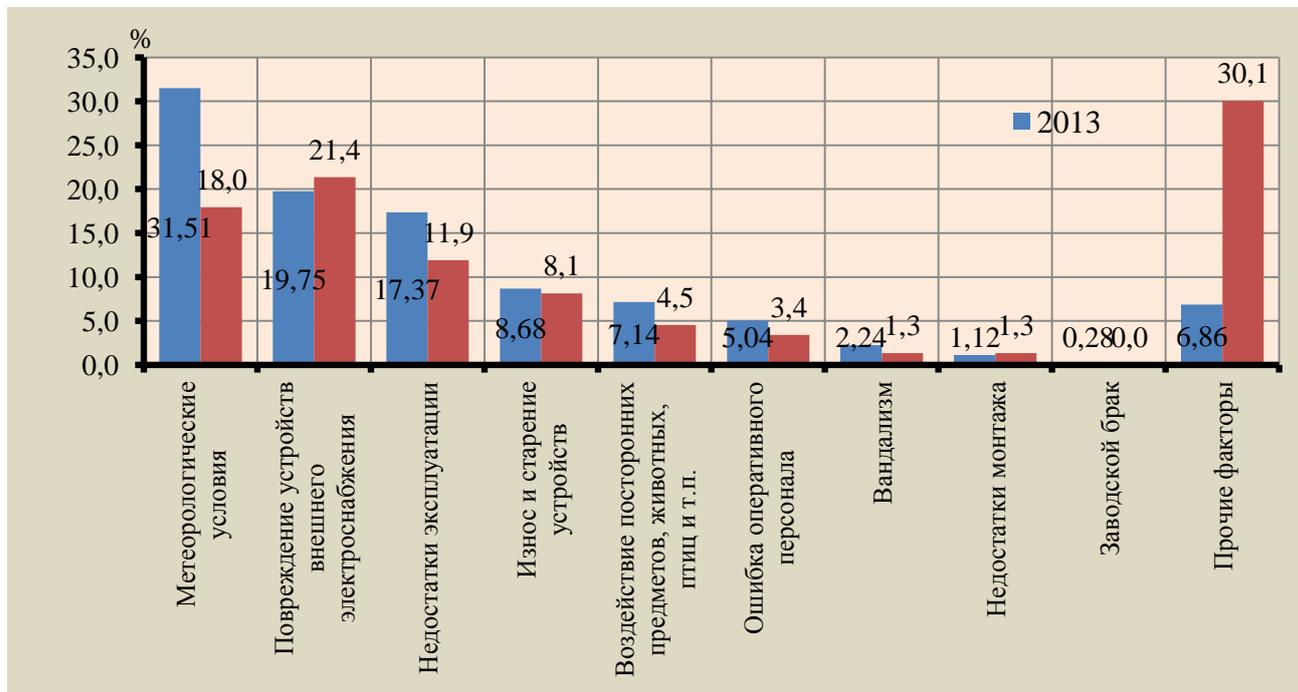


Рисунок 1.13 – Основные факторы, повлиявшие на нормальную работоспособность электроснабжения устройств СЦБ и ПЭ

Из приведенных диаграмм (рисунки 1.12–1.13) можно выявить перечень характерных дефектов элементов поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП 6–10 кВ, который представлен на рисунке 1.14 [86].

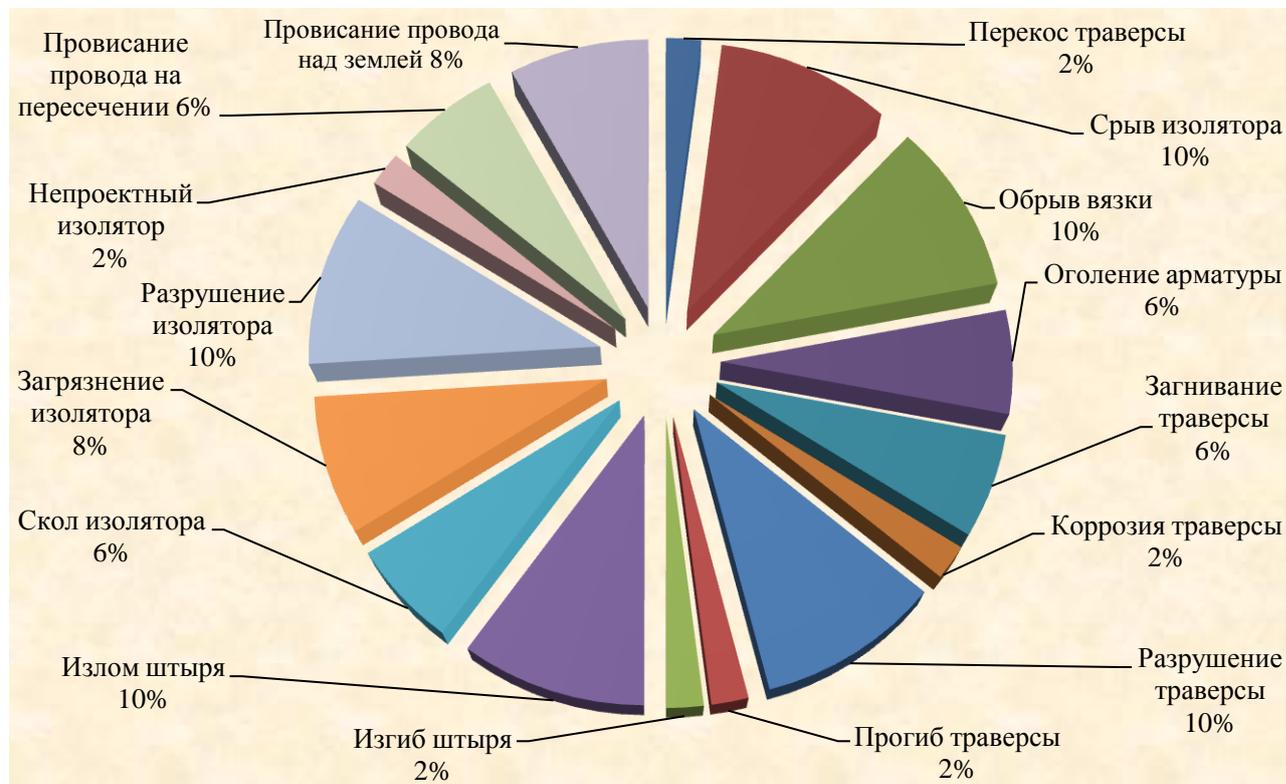


Рисунок 1.14 – Перечень характерных дефектов элементов поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП 6–10 кВ

На основании ежегодных анализов работы хозяйства электрификации и электроснабжения – Управления электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры филиала ОАО «РЖД» – проведен обзор технического состояния поддерживающих конструкций с 2003 по 2014 год и построена диаграмма количества отказов кронштейнов и изоляторов за рассмотренный период (рисунок 1.15) [86]. Из рисунка 1.15 видно, что ежегодное число выхода из строя изоляторов уменьшается, а кронштейны находятся примерно на одном уровне. На рисунке 1.16 приведено количество отказов кронштейнов и изоляторов в процентном соотношении относительно всех нарушений нормальной работы устройств электроснабжения СЦБ и ПЭ в период с 2003 по 2014 год.

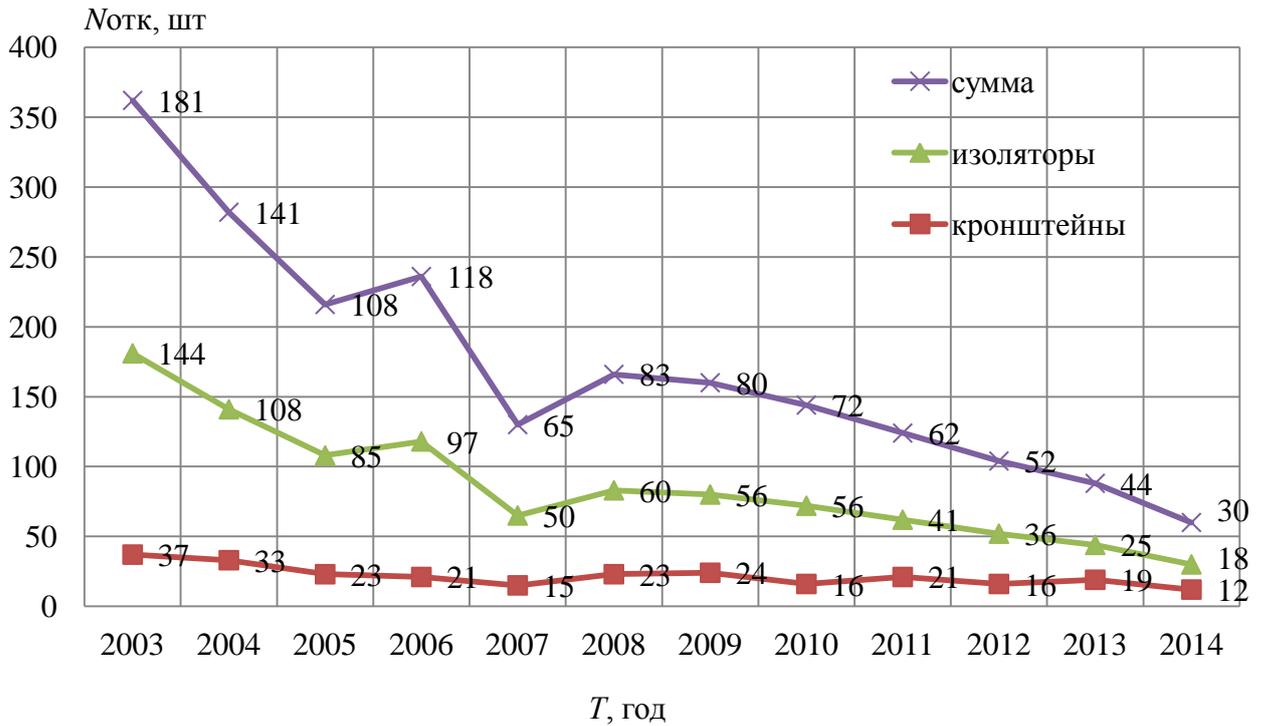


Рисунок 1.15 – Диаграмма количества отказов кронштейнов и изоляторов в период с 2003 по 2014 год

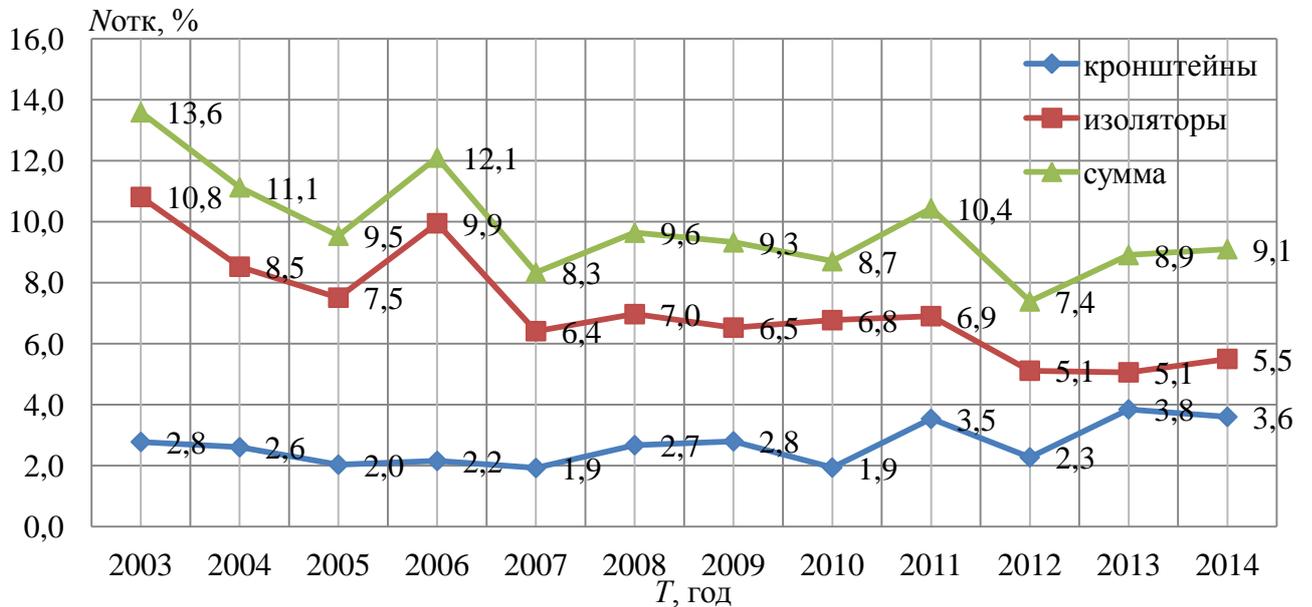


Рисунок 1.16 – Процентное соотношение отказов кронштейнов и изоляторов в период с 2003 по 2014 год

Из статистического анализа [86] определено, что в среднем ежегодно отказы кронштейнов составляют 2,7 %, изоляторов – 7,2 %, в сумме – около 10 % от общего числа нарушений нормальной работы устройств СЦБ и ПЭ. При этом 50 % дефектов приходится на механические повреждения изоляторов и узлов их фиксации, 8 % – на коррозию металлических и загнивание деревянных траверс (см. рисунок 1.14).

С целью определения принципов возникновения дефектов поддерживающих конструкций в процессе эксплуатации проведены теоретические исследования по определению механической прочности металлических кронштейнов (КВЛЦ-50, СИП-3, СИП-3п, М-2) и применяемых на них изоляторов (ШФ-20Г, ПС-70Е) [87]. Для этого в программе *SolidWorks* создаются модели кронштейнов и изоляторов. При построении моделей учитываются следующие параметры: геометрические размеры и формы, характер воздействия нагрузок на исследуемую модель, сетка расчета. Для прочностного расчета программная среда *SolidWorks* применяет метод конечных элементов (МКЭ) [88, 89].

На узел крепления проводов будет действовать вертикальная сила тяжести от веса провода с гололедом и горизонтальная сила аэродинамического сопротивления ветровому потоку, которая в задаче принимается как 30 % от силы тяжести [90].

$$F_{rw} = 0,3 \cdot G. \quad (1.1)$$

Результирующая сила, воспринимаемая каждым креплением проводов, равна

$$F = \sqrt{G^2 + F_{rw}^2}. \quad (1.2)$$

В соответствии с программой испытаний на механическую прочность узлов и деталей контактной сети электрифицируемых железных дорог [90] результирующая нагрузка приложения сил тяжести от каждого провода рассматривается в

диапазоне $G_i = 2,0 \div 3,0$ кН при одновременном воздействии аэродинамической силы $F_{rw} = 30 \div 100$ % от G_i . Рассмотренные диапазоны нагрузок соответствуют применению самонесущих изолированных проводов сечением токопроводящей жилы от 50 мм^2 до 120 мм^2 в гололедных районах до V (толщина стенки гололеда 25 мм) включительно, при одновременном воздействии ветровых нагрузок до 36 м/с включительно, что соответствует V ветровому району на основании [91]. Полученные данные результирующей силы приведены в таблице 1.2.

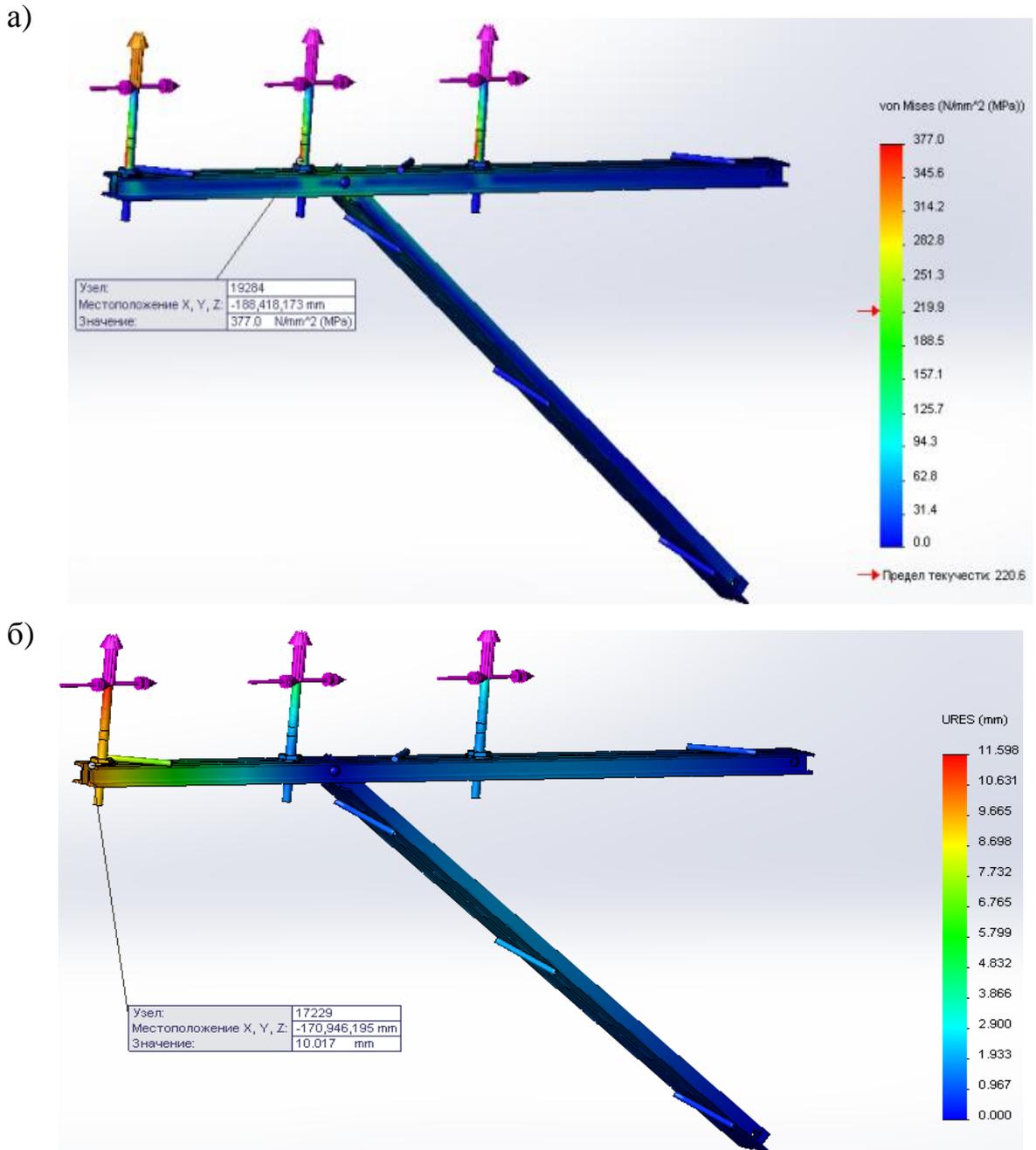
Таблица 1.2 – Результирующая сила, воспринимаемая каждым креплением проводов F , Н

G_i , Н	F_{rw} , % от G_i							
	30	40	50	60	70	80	90	100
2000,00	2088,06	2154,07	2236,07	2332,38	2441,31	2561,25	2690,72	2828,43
2100,00	2192,46	2261,77	2347,87	2449,00	2563,38	2689,31	2825,26	2969,85
2200,00	2296,87	2369,47	2459,67	2565,62	2685,44	2817,37	2959,80	3111,27
2300,00	2401,27	2477,18	2571,48	2682,24	2807,51	2945,44	3094,33	3252,69
2400,00	2505,67	2584,88	2683,28	2798,86	2929,57	3073,50	3228,87	3394,11
2500,00	2610,08	2692,58	2795,08	2915,48	3051,64	3201,56	3363,41	3535,53
2600,00	2714,48	2800,29	2906,89	3032,09	3173,70	3329,62	3497,94	3676,96
2700,00	2818,88	2907,99	3018,69	3148,71	3295,77	3457,69	3632,48	3818,38
2800,00	2923,29	3015,69	3130,50	3265,33	3417,84	3585,75	3767,01	3959,80
2900,00	3027,69	3123,40	3242,30	3381,95	3539,90	3713,81	3901,55	4101,22
3000,00	3132,09	3231,10	3354,10	3498,57	3661,97	3841,87	4036,09	4242,64

При определении механической прочности металлических кронштейнов и применяемых на них изоляторов, устанавливается максимальная результирующая сила, воспринимаемая каждым креплением проводов $F = 4242,64$ Н.

На рисунке 1.17 представлена модель металлического кронштейна СИП-3, аналогичные модели для других кронштейнов выполнены и исследованы в [87]. На основе моделирования построены эпюры внутренних напряжений по Мизесу и перемещений. Критерий максимального напряжения по Мизесу основывается на теории Мизес-Хенки (*Mises-Hencky*), также известной как теория энергии формоизменения. Теория утверждает, что пластичный материал начинает повреждаться в местах, где напряжение по Мизесу становится равным

предельному напряжению. В большинстве случаев предел текучести используется в качестве предельного напряжения. Однако программа позволяет использовать предельное растяжение или задавать свое собственное предельное напряжение $\sigma_{\text{vonMises}} \geq \sigma_{\text{max}}$ [88, 89].



а) эпюра напряжений при $-F_{rw}$; б); эпюра перемещений при $-F_{rw}$

Рисунок 1.17 – Модель металлического кронштейна СИП-3
в программе *SolidWorks*

По результатам анализа прочности металлических кронштейнов (рисунок 1.18) построена диаграмма эквивалентных напряжений в соответствии с приложенными нагрузкам от сил тяжести каждого провода $G_i=3,0$ кН при воздействии аэродинамического сопротивления $\pm F_{rw}=100\%$ от G_i [87]. Предел текучести (σ , МПа) стали СтЗпс5, применяемой для изготовления исследуемых кронштейнов, равен 245 МПа [92]. Результаты перемещения представлены в виде диаграммы (рисунок 1.19), по которой определены максимально допустимые значения прогиба для каждого металлического кронштейна с учетом условия $\delta_{\text{доп}} \leq 1/150$ [48].

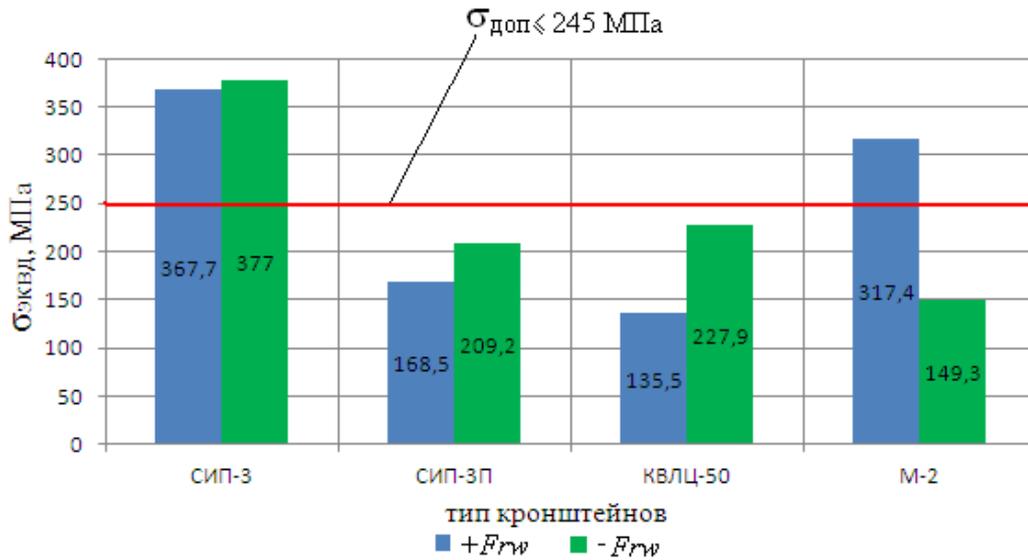


Рисунок 1.18 – Диаграмма напряжений $\sigma_{\text{эквд}}$ металлических кронштейнов

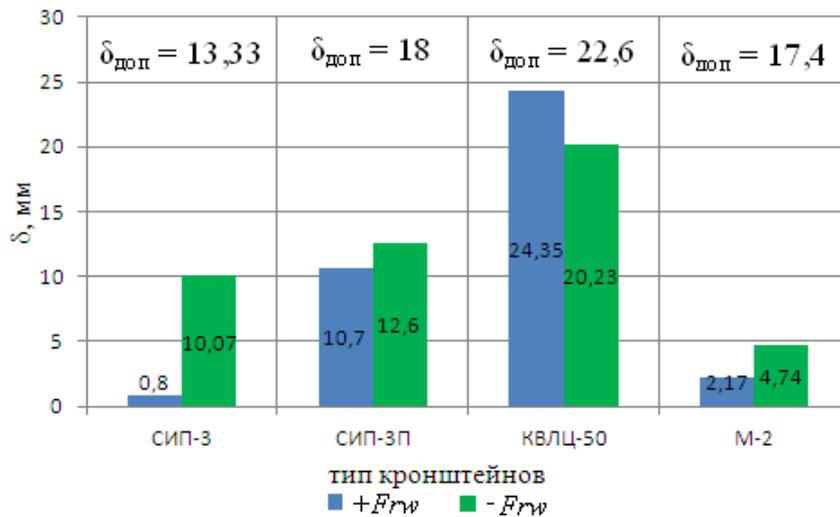
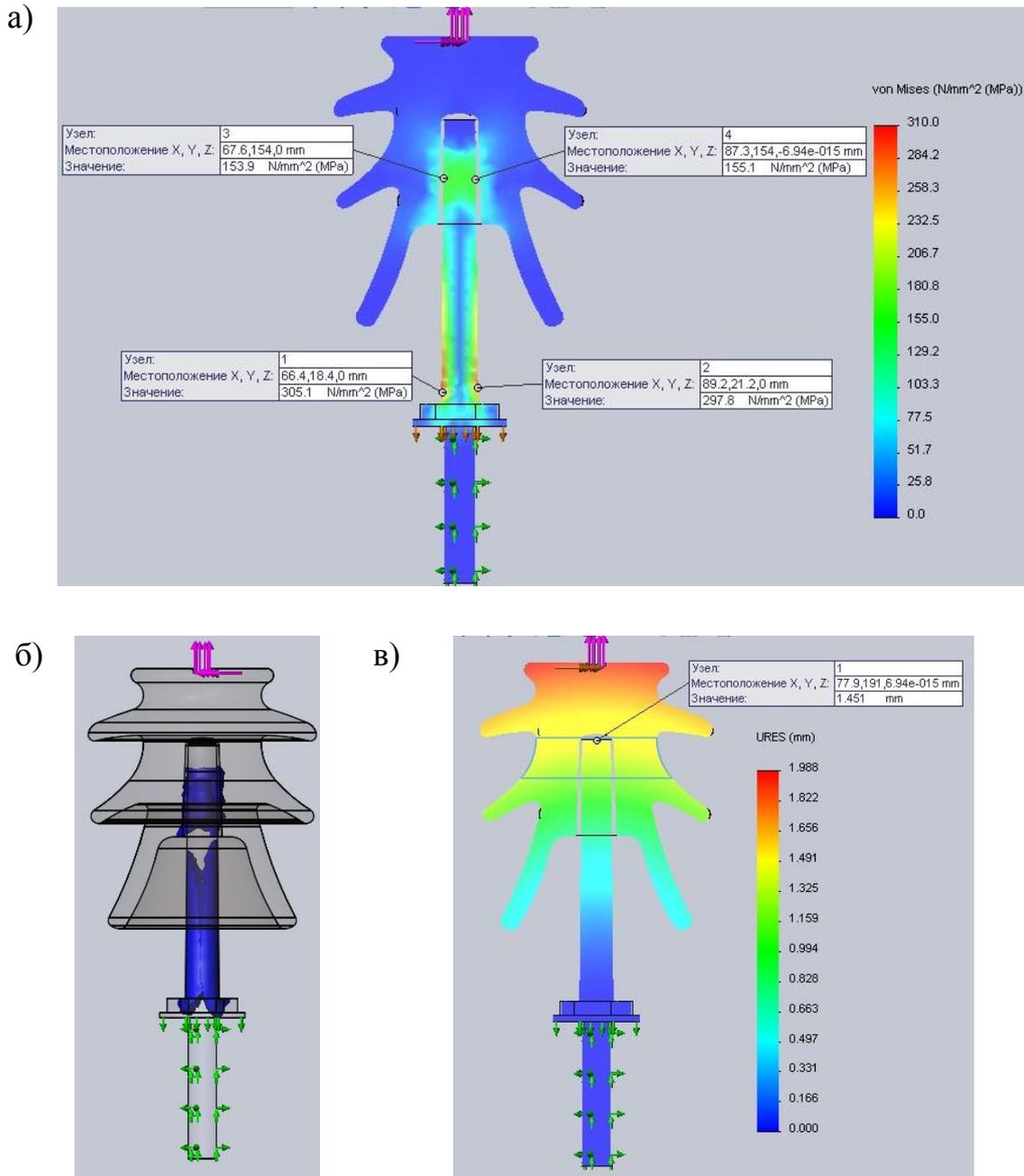


Рисунок 1.19 – Диаграмма прогибов кронштейнов (δ) при $\pm F_{rw}$

Используя те же принципы, в *SolidWorks* смоделированы процессы приложения нагрузок к изоляторам [87]. На рисунке 1.20 представлена модель штыревого изолятора ШФ-20Г, для гирлянды из двух ПС-70Е исследования выполнены аналогично и представлены в [87].



а) эпюра напряжений на штыре; б) эпюра распределения напряжения в сечении; в) эпюра перемещений

Рисунок 1.20 – Изоляторов ШФ-20Г

По проведенным исследованиям установлено, что у штыревых изоляторов напряжения, вызывающие пластическую деформацию, возникают у основания штыря $\sigma = 291$ МПа, в узле крепления изолятора со штырем $\sigma = 156$ МПа. Наибольшее перемещение δ относительно оси штыря составляет 1,4 мм. У подвесных изоляторов в гирлянде ПС-70Е наибольшее напряжение, возникающее на пестике, имеющее ярко выраженный характер в области бетонной заделки изолятора и равно 1090,4 МПа. Перемещение $\delta = 11,961$ мм с учетом бокового наклона из-за шарнирного крепления [87].

По данным статистического анализа [86] и результатам исследования, приведенным в [87], следует, что около 13 % нарушений нормальной работы (см. рисунок 1.13) вызваны неправильной эксплуатацией и некачественным монтажом поддерживающих конструкций, вследствие чего происходит ускоренный износ (около 9 %, рисунок 1.13) наиболее слабых по прочности элементов поддерживающих конструкций.

Одним из направлений по сокращению этих дефектов может быть применение полимерных поддерживающих конструкций, которые не имеют изоляторов, не подвержены коррозии и загниванию. Это позволит более чем в два раза сократить количество отказов, вызванных механическими повреждениями изоляторов и узлов их фиксации, коррозией и загниванием, что уменьшит число нарушений нормальной работы поддерживающих конструкций с 10 до 4 % от общего числа. Таким образом, повысится надежность поддерживающих конструкций, а следовательно, и системы электроснабжения устройств СЦБ и ПЭ. Применение поддерживающих конструкций из полимерных материалов позволит перейти к обслуживанию воздушных линий по техническому состоянию, что приведет к снижению капитальных и эксплуатационных расходов хозяйства электрификации и электроснабжения, а это является одной из приоритетных задач ОАО «РЖД».

1.3 Анализ направлений научных исследований в области применения полимерных материалов на железнодорожном транспорте

Основными направлениями научных исследований в области железнодорожного транспорта, реализация которых помимо прочих источников предусматривает финансирование за счет средств открытого акционерного общества «Российские железные дороги», являются [1–4]:

– применение малообслуживаемых конструкций инфраструктуры железнодорожного транспорта, оборудования железнодорожной автоматики, связи и системы электроснабжения;

– использование конструкций из полимерных материалов и конечных продуктов нанотехнологий.

В России, Германии, Нидерландах, США, Японии, и др. странах были проведены научные исследования, позволившие приступить к практической разработке программы по изучению возможного применения полимеров как альтернатива металлу [93].

Значительный вклад в изучение и применение полимеров на электрифицированных железных дорогах внесли: В. Д. Потапов, Ю. И. Горошков, А. М. Лукьянов, Ю. Н. Шумилов, З. С. Бакалов, Л. Г. Помаков и др. [94, 95]. Однако работы ученых направлены на разработку полимерных изоляторов, которые по-прежнему являются одним из элементов поддерживающих конструкций.

Для радикального изменения ситуации, сложившейся с применением полимерных композитов, конструкций и изделий из них в Российской Федерации, Министерством регионального развития России разработана «Программа внедрения полимерных материалов (композитов), конструкций и изделий из них в строительном комплексе Российской Федерации» [93].

В настоящее время ОАО «Российские железные дороги» внедряют продукцию портфельных компаний РОСНАНО и других производителей композитных

материалов на объектах железнодорожной инфраструктуры. Одним из приоритетных направлений применения новых материалов на железнодорожном транспорте станет замена поддерживающих конструкций и металлической арматуры контактной сети и ВЛ на арматуру, изготовленную из композитов [93].

В нашей стране начался выпуск опытных партий консолей, фиксаторов и кронштейнов проводов из полимерного материала.

Разработчиками полимерной консоли являются ООО «НЦК» и ЗАО «ХК «Композит». Консоль проходит эксплуатационные испытания в Щербинке [96, 97].

В 2011 году ПКБ ЭЖД ОАО «РЖД» завершило разработку конструкторской документации изолирующих полимерных кронштейнов (КИП) для проводной радиосвязи [98].

Анализ направлений отечественных и зарубежных разработок в данной области показал, что исследования не охватывают применение композитов как материала для изготовления кронштейнов воздушных ЛЭП устройств СЦБ и линий продольного электроснабжения напряжением 6–10 кВ.

1.4 Анализ свойств и характеристик полимерных материалов для использования при разработке поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ

На основании анализа применения полимеров на железнодорожном транспорте в 2011 году УрГУПС совместно с ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» начали разработку полимерного кронштейна для воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

В ходе решения вопроса о возможности применения полимера (стеклопластика) в качестве материала для изготовления поддерживающих конструкций, проведен сравнительный анализ механических характеристик металлических и полимерных изделий [99, 100, 101].

Экспериментальные исследования механической прочности стеклопластикового профиля проведены в климатической камере *Techno7010W_i* испытательного центра технических средств железнодорожного транспорта Уральского государственного университета путей сообщения (ИЦ ТСЖТ УрГУПС) [102]. Основные технические характеристики камеры приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Технические характеристики климатической камеры *Techno7010W_i* «ИЦ ТСЖТ УрГУПС»

Наименование	Пределы
1. Общие параметры	
Полезный объем	10 м ³
Температурный диапазон	-70...+100 °С
Точность по температуре	≤ ±1 °С
Диапазон температур	+10...+90 °С
Точность по температуре	≤ ±1,0 °С
Диапазон влажности (влажность без учета рассеяния)	20...90 %
Диапазон точки росы	+5...+88 °С
2. Конструкция	
Внутренние размеры	2000 мм ширина 2400 мм глубина 2200 мм высота
Рабочая площадь	4,4 м ²
Размеры двери	2000 мм ширина 2200 мм высота
Освещение в камере	2 лампы по 150 Вт
Допустимая нагрузка на пол	15.000 Н/м ²
Нагрузка	1000 Н/на 4 см ²

В качестве объекта испытаний принят стеклопластиковый профиль, геометрические размеры которого приведены на рисунке 1.21. Экспериментальные исследования механической прочности стеклопластикового профиля проведены при четырех режимах: 1 – нормальной температуры; 2 – минимальной температуры; 3 – максимальной температуры; 4 – в режиме максимальной температуры при высокой влажности. На станину (раму) с одной стороны жестко закреплен стекло-

пластиковый профиль, с другой стороны, при помощи пневматического домкрата через динамометр (5кН, класс точности 1, погрешность измерений 0,005 кН), плавно подавалась нагрузка до появления характерного треска и излома профиля (рисунок 1.22). Полученные результаты приведены в таблице 1.4.

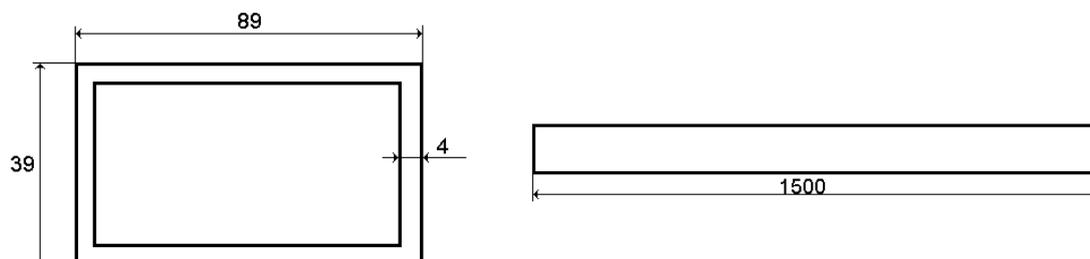


Рисунок 1.21 – Геометрические размеры стеклопластикового профиля



Рисунок 1.22 – ИЦ ТСЖТ стенд испытаний стеклопластикового профиля на механическую прочность, разрушение образца.

Таблица 1.4 – Результаты экспериментальных исследований стеклопластикового профиля на механическую прочность

Режим испытания	t , °C	RH , %	G , кН	δ , мм
$t_{\text{норм}}$	+25	50	2,05	140
t_{min}	-57	50	1,604	128
t_{max}	+50	50	1,89	181
t_{max}	+50,6	98,6	1,85	176

где t – температура, °С;

RH – относительная влажность воздуха, %;

G – нагрузка, кН;

δ – перемещение свободного конца профиля, мм.

Для верификации полученных значений прогиба используется программа «POLUS v.2.1.1» [103]. Данная программа предназначена для расчета стержневых конструкций и построения эпюр. В программе предусмотрено все, что необходимо для эмуляции физической модели. При этом можно задавать точки опоры, ребра жесткости, указывать силы, расставлять моменты и нагрузки, а также просматривать эпюры моментов поперечных и продольных сил, осуществлять коррекцию модели и просматривать отчет по исследуемой конструкции (в нем будут указаны точные численные значения моментов, сил и перемещений).

Для расчета задаются физико-геометрические характеристики: размеры профиля, точки приложения нагрузок и фиксации стержней; свойства стержней (материал); нагрузки, действующие на образец.

На основе параметров материала (модуль упругости $E = 40000$ МПа, предел прочности на изгиб $\sigma = 100$ МПа) [92] при приложении нагрузки $G = 2$ кН, построены эпюра изгибающих моментов и схема перемещения, приведенные на рисунках 1.23 и 1.24.

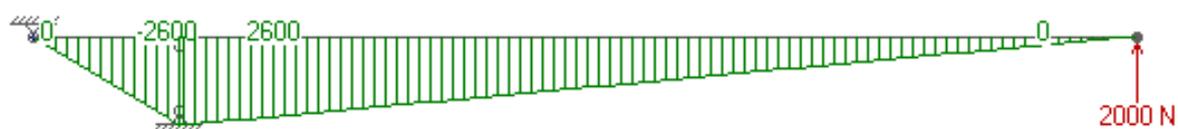


Рисунок 1.23 – Эпюра изгибающих моментов стеклопластикового профиля



Рисунок 1.24 – Схема перемещения стеклопластикового профиля

Расчет по программе «POLUS v.2.1.1» (см. рисунок 1.24) показал, что перемещение свободного конца профиля составляет 176 мм, что соответствует пределам перемещения, зафиксированным при натуральных испытаниях.

Используя программный комплекс *Solid Works Simulation* [88, 89], выполнено моделирование механической прочности стеклопластикового и металлического профилей. Для статического анализа введены физические параметры материалов и одинаковые геометрические размеры образцов (профилей). Чтобы стабилизировать модель, один конец образца зафиксирован. На основе моделирования построены эпюры внутренних напряжений по Мизесу, которые приведены на рисунках 1.25 и 1.26.

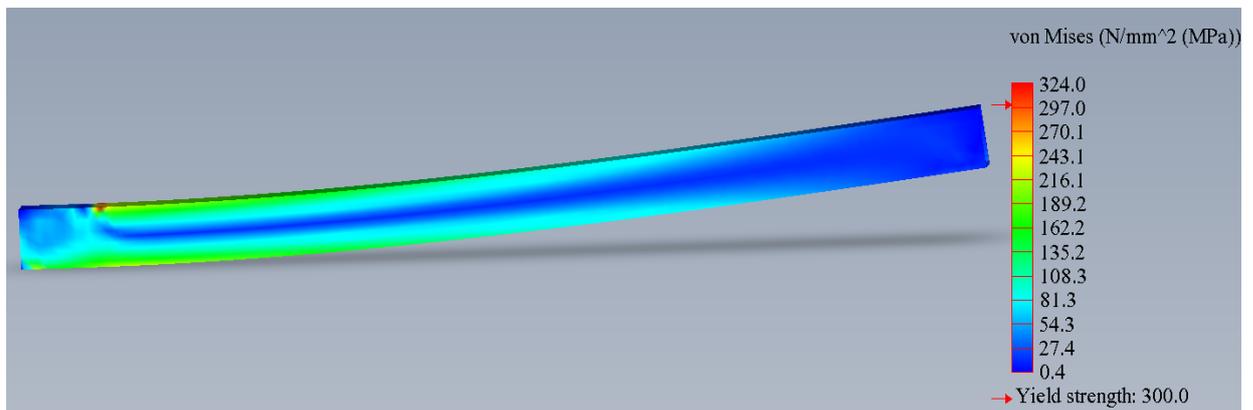


Рисунок 1.25 – Эпюра внутренних напряжений для стеклопластика

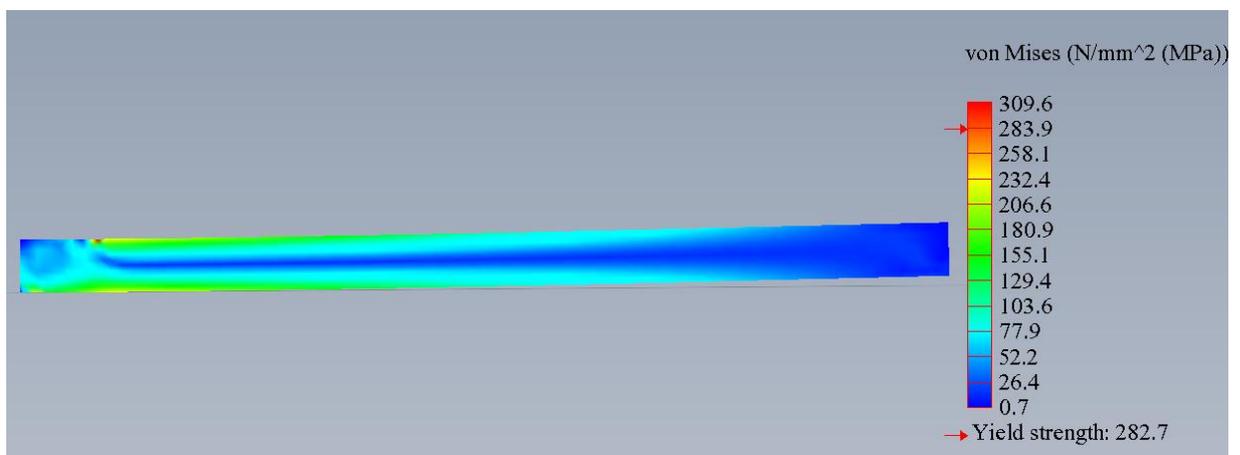


Рисунок 1.26 – Эпюра внутренних напряжений для металла

Из эпюр (см. рисунки 1.25 и 1.26) следует, что внутренние напряжения, при которых происходит разрушение образцов, примерно одинаковые, а перемещение свободных концов разное, это соответствует разному модулю упругости ($E=40000$ МПа – стеклопластика; $E = 200000$ МПа – металла) [99].

По результатам проведенных практических и теоретических исследований следует, что стеклопластик как материал по механической прочности не уступает металлу. На основании проведенного анализа сортамента полимеров определено, что стеклопластик профильный электроизоляционный СПП-ЭИ(Н) обладающий необходимыми электромеханическими свойствами [104], может быть использован для изготовления поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

СПП-ЭИ(Н) – стеклопластик профильный на основе эпоксидного компаунда, электроизоляционный высоковольтный коррозионностойкий с круглой формой поперечного сечения, класс нагревостойкости 180 °С, предназначен для изделий исполнения УХЛ, категория размещения 1 по [105], выпускается по [104]. Рассмотрены свойства и характеристики полимерных материалов. Технология проката и вытягивания нановолокон композитных материалов позволяет изготавливать профили (стержни) различных форм и диаметров. Стержни изготовлены методом непрерывной протяжки через формующую фильеру стеклоровинга, предварительно пропитанного связующим составом на основе эпоксидных смол и предназначенного для работы на воздухе, в условиях нормальной относительной влажности окружающей среды 45 – 75 % при температуре от +180 °С до –70 °С, при напряжении выше 1000 В. СПП-ЭИ(Н) не подвержен влиянию ультрафиолета, обладает низкой абсорбцией влаги, что гарантирует изготовитель на основании технических условий [104] (ТУ 2296-009-37925603-2013 «Стеклопластики профильные электроизоляционные»), зарегистрированных Росстандартом № 070/013460 от 19.12.12 (ФБУ «УРАЛТЕСТ»). Технические требования, требования к безопасности, методы испытаний, транспортирование, хранение, гарантии изготовления приведены в технических условиях [104]. ТУ отвечают требованиям ГОСТ по каждому показателю, приведенному в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Физико-механические и электрические свойства СПП-ЭИ(Н)

№ п/п	Наименование показателя	Норма
1	Разрушающее напряжение при статическом изгибе поперек волокон в исходном состоянии, МПа, не менее	1000
2	E-модуль упругости, МПа	40 000
3	Ударная вязкость поперек волокон, кДж/м ² , не менее	250
4	Разрушающее напряжение при растяжении, МПа, не менее	800
5	Плотность, кг/м ³	1900-2200
6	Водопоглощение, %, не более	0,03
7	Нагревостойкость, °С, не менее	180
8	Удельное поверхностное электрическое сопротивление, Ом, не менее	10 ¹³
9	Электрическая прочность вдоль волокон при частоте 50 Гц в исходном состоянии, МВ/м	4,5
10	Электрическое напряжение, выдерживаемое образцом в течение 1 мин после кипячения в течение 100 час (диффузия влаги), кВ, не менее	12
11	Время проникновения 1 % раствора фуксина через образец длиной 10±, не менее, минут	15

С целью определения изоляционных свойств стеклопластика СПП-ЭИ(Н) и возможности его применения для изготовления кронштейна воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ в электротехнической лаборатории ремонтно-ревизионного участка (РРУ) Челябинской дистанции электроснабжения Южно-Уральской дирекции инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» проведены экспериментальные исследования. Целью испытаний являлось определение изоляционных свойств стеклопластика СПП-ЭИ(Н). Объектом испытаний – цилиндрический профиль (траверса), диаметром 46 мм, длиной 1,5 м, выполненный из стеклопластика СПП-ЭИ(Н). Испытания проводились на испытательном оборудовании (стенде, ячейке) для проведения электрических испытаний. Стенд аттестован в установленном порядке в соответствии с [106]. Перед испытаниями произведен тщательный осмотр объекта испытаний с целью выявления возможных неисправностей и дефектов как на полном, так и на укороченном образце.

В ячейке проведения высоковольтных испытаний закрепили траверсу, один конец которой заземлили, а на другой подавалось переменное напряжение (рисунок 1.27).



Рисунок 1.27 – Фрагмент проведения электрических испытаний

Электрические испытания проводились с помощью аппарата испытания диэлектриков (АИД-70М) [107]. Используемый аппарат АИД-70М №3703 поверен, срок поверки годен до 24.12.2013, испытания проведены 17.05.2013 (ПРИЛОЖЕНИЕ А). Технические характеристики АИД-70М приведены в таблице 1.6.

Регистрацию поверхностного сопротивления изоляции стеклопластиковой траверсы осуществляли используя Мегомметр *MI 3102 CL* (№12191103 поверен, срок поверки годен до 23.10.2014, даты проведения испытаний 22.04.2013, 17.05.2013, ПРИЛОЖЕНИЕ А) [108], технические характеристики которого приведены в таблице 1.7. Сопротивление изоляции измерялось при номинальном испытательном напряжении 2500 В постоянного тока в соответствии с [52].

Таблица 1.6 – Технические характеристики аппарата АИД-70 М

Наименование	Пределы
Диапазон регулирования напряжения (постоянного/переменного)	0-70/0-50 кВ
Ток нагрузки при постоянном/переменном напряжении	0-10 мА/0-20 мА
Непосредственное измерение напряжения на нагрузке с относительной (абсолютной) погрешностью	не более 3 %
Защита от превышения максимального напряжения и тока нагрузки	есть
Пределы измерения тока на дополнительном диапазоне для переменного/постоянного тока	0-2000 мкА/0-1000 мкА
Напряжение питания	(220±22) В, 50 Гц

Таблица 1.7 – Технические характеристики Мегомметр *MI 3102 CL*

Диапазон измерения (МОм)	Разрешение (МОм)	Погрешность измерения
0,000 ... 1,999	0,001	$\pm(0,02 \times R_{\text{изм}} + 3 \text{ ед. мл. р.})$
2,00 ... 99,99	0,01	
100,0 ... 199,9	0,1	
200 ... 1999	1	$\pm(0,1 \times R_{\text{изм}})$
2,00 ГОм ... 9,99 ГОм	10	
$R_{\text{изм}}$ – измеренное значение сопротивления изоляции		

Определение величины тока утечки производилось на полном и укороченном образце траверсы кронштейна при неизменном испытательном напряжении в соответствии с [109]. Значения токов утечки в целесообразных целях использовались только как вспомогательные данные наряду с результатами прямых измерений изолирующей способности. Измерения токов утечки позволяют дать рекомендации по установке изоляции в определенные зоны загрязнения атмосферы. При этом величина сопротивления изоляции должна соответствовать требованиям [52].

Ход испытаний включал в себя следующие этапы:

1. На испытуемую часть траверсы кронштейна длиной $l = 1,5\text{ м}$ подавалось напряжение 50 кВ согласно п.1.8.35 [52], которое выдерживалось в течение 5 минут на основании п. 7.4.2.2 [110]. Ток утечки составил 0,24 мА.

2. Испытуемая часть объекта испытаний $l = 1\text{ м}$, $U = 50\text{ кВ}$, $t = 5\text{ минут}$, ток утечки $I_{\text{ут}} = 0,36\text{ мА}$.

3. Испытуемая часть объекта испытаний $l = 1\text{ м}$. На поверхность кронштейна с помощью пульверизатора нанесли водяной слой, при этом была отмечена гидрофобность стеклопластика, под напряжением 50 кВ образец выдержан в течение $t = 5\text{ минут}$, ток утечки $I_{\text{ут}} = 0,45\text{ мА}$.

4. При нормальных атмосферных условиях ($t_0 = 20\text{ °С}$, $P_0 = 760\text{ мм рт. ст.}$, $h_0 = 11\text{ г/м}^3$) в соответствии с [110] мегомметром *MI 3102 CL* произведен замер поверхностного сопротивления изоляционной части полимерного кронштейна при номинальном испытательном напряжении 2500 В постоянного тока в соответствии с [52], которое составило $R_{\text{из}} = 6000\text{ МОм}$, что соответствует требованиям [52], где $R_{\text{из}}$ должно быть не менее 300 МОм.

5. На объект испытания, согласно п.1.8.35 [52], подавали переменное напряжение 50 кВ, при этом испытания проводили на полном и на укороченном образце элемента полимерного кронштейна, между фазой и заземлением в соответствии с [110, 111]. Опыты выполняли ступенями, с выдержкой времени по 5 минут в соответствии с п. 7.4.2.2 [111] для каждой длины образца. Результаты исследований приведены в таблице 1.8.

Таблица 1.8 – Результаты электрических испытаний полимерного кронштейна сухоразрядным переменным напряжением

Подаваемое напряжение, кВ	Испытуемое расстояние, мм	Выдержка времени, мин	Ток утечки, мА
50	1000	5	0,31
	800		0,32
	600		0,37
	400		0,37
	200		0,38
	150		0,39
	100		0,40

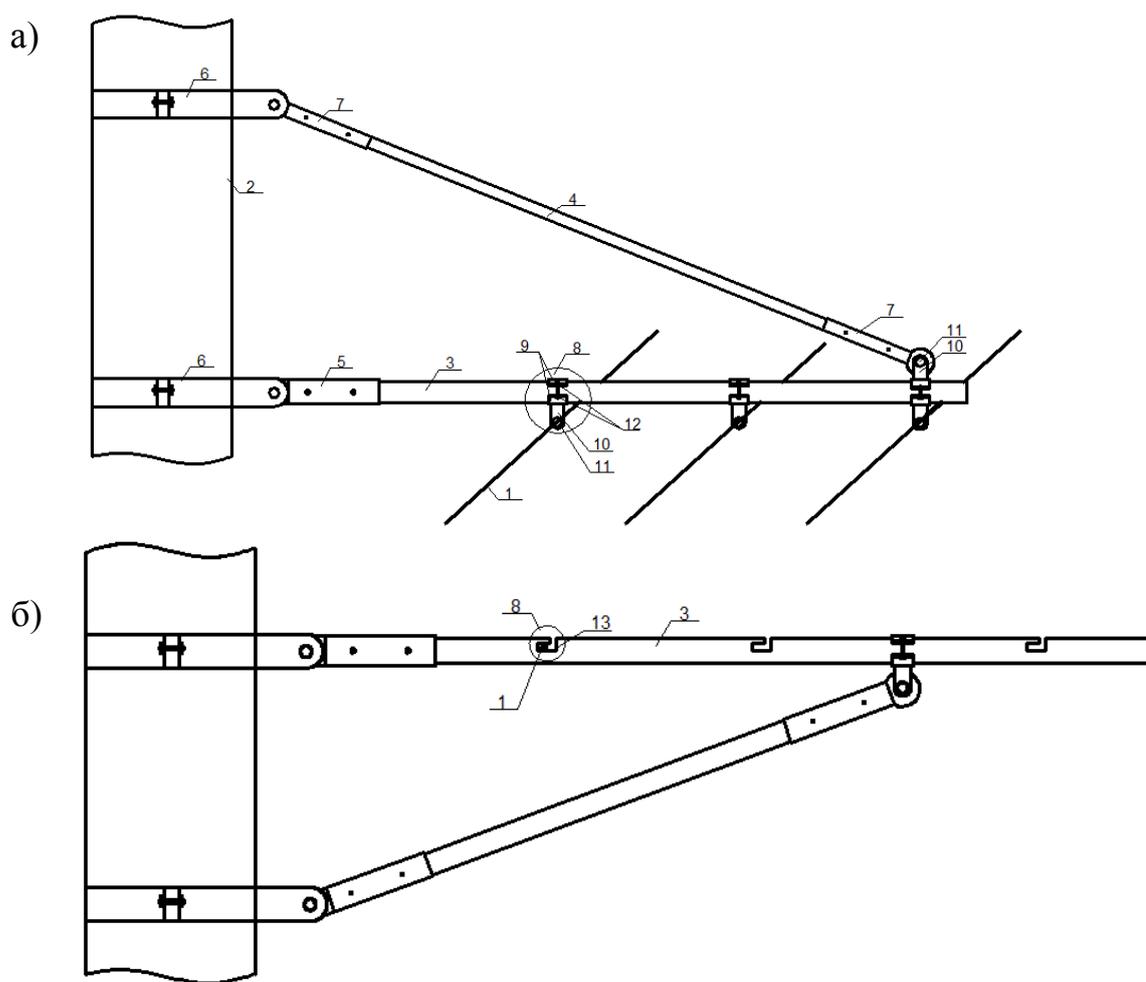
Результаты электрических испытаний по определению изоляционных свойств стеклопластика СПП-ЭИ(Н) оформлены протоколами испытания изоляции (ПРИЛОЖЕНИЕ А).

Заключение комиссии – траверса стеклопластиковая испытания повышенным напряжением выдержала. Испытуемое расстояние 100 мм траверсы испытательное напряжение выдержало. Изоляция траверсы соответствует норме. Сопротивление изоляции траверсы стеклопластиковой на 100 мм длины составляет $R_{из} = 6000$ МОм. Оборудование можно вводить в эксплуатацию.

На основании проведенных электрических испытаний определено, что стеклопластик профильный электроизоляционный СПП-ЭИ(Н) может быть использован как материал при изготовлении полимерных поддерживающих конструкций.

1.5 Разработка схемных решений поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ с учетом особенностей полимерных материалов

По проведенным исследованиям [99, 100, 101] о возможности применения композитного материала для изготовления кронштейна воздушных ЛЭП 6–10 кВ, разработаны схемные решения (рисунок 1.28) выполнения полимерных кронштейнов, которые представляют собой связь полимерных стержней (траверса, тяга, подкос).



а) Модель кронштейна с тягой; б) Модель кронштейна с подкосом

Рисунок 1.28 – Схемные решения выполнения полимерного кронштейна

На рисунке 1.28 представлено: 1 – провод; 2 – опора; 3 – стеклопластиковая траверса; 4 – стеклопластиковая тяга; 5 – металлический оконцеватель траверсы; 6 – полухомут; 7 – металлический оконцеватель тяги; 8 – узел крепления проводов; 9 – полухомут с накладкой; 10 – «ушко»; 11 – отверстие для «пальца»; 12 – болтовое соединение накладки и полухомута; 13 – паз для укладки провода.

Полимерный кронштейн не имеет изоляторов, так как выполнен из изоляционного материала. Крепление проводов осуществляется в седла или другие универсальные узлы крепления проводов отечественных производителей, которые через хомуты крепятся непосредственно к профилю (стержням). Полимерный кронштейн рассматривается как комплексная поддерживающая конструкция, включающая в себя механические и электрические составляющие. На данное устройство оформлен патент на полезную модель [112].

1.6 Разработка требований и критериев оценки полимерного кронштейна воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ

При разработке полимерного кронштейна проведен анализ требований предъявляемых к поддерживающим конструкциям воздушной линии электропередачи напряжением 6–10 кВ устройств сигнализации, централизации и блокировки и линии продольного электроснабжения.

С использованием нормативов металлических кронштейнов, стеклянных, фарфоровых и полимерных изоляторов сформулированы основные требования, которым должны отвечать полимерные кронштейны.

1. Механическая прочность полимерного кронштейна обеспечивается при соблюдении условий:

– эквивалентное динамическое напряжение не должно превышать соотношения $\sigma_{\text{эквд}} \leq \sigma_{\text{доп}}$ МПа [104, 113–115];

– прогиб сжато-изогнутых элементов не должен превышать соотношения 1/150 длины элемента [48].

2. Электрическая прочность полимерного кронштейна обеспечивается при соблюдении условий:

– 50 %-ное разрядное напряжение не должно превышать нормируемых допустимых значений в соответствии с [52, 109, 116–121];

– удельная поверхностная проводимость соответствующей зоны загрязнения не должна превышать нормируемых допустимых значений в соответствии с [52, 109, 116–121];

– кронштейн должен быть стойким к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом (грозовому перенапряжению). Крутизна фронта импульса должна быть не менее 1000 кВ/мкс [109, 110, 122, 123].

3. Полимерный кронштейн должен отвечать требованиям термомеханической прочности по [109]. Кронштейн считается выдержавшим испытания, если не произошло смещение оконцевателей, деформации или растрескивания стержней, прогиб не превышает 1/150 длины элемента, не появились трещины, местная эрозия, науглероженные побеги общей длиной 10 см и не произошло пробоя изоляционной части.

Выводы по первой главе

1. Из статистического анализа и по результатам проведенных исследований выявлены наиболее слабые по прочности элементы поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП устройств СЦБ и ПЭ. Определены основные факторы, из-за

которых происходят отказы кронштейнов и изоляторов, рассчитаны величины нагрузок, при которых происходит их разрушение. Одним из решений по повышению работоспособности воздушных ЛЭП может быть применение полимерных поддерживающих конструкций. Это позволит сократить количество отказов с 10 до 4 % от общего числа нарушений нормальной работы устройств СЦБ и ПЭ.

2. В результате проведенного исследования в области применения полимерных поддерживающих конструкций определено, что стеклопластик профильный электроизоляционный СПП-ЭИ(Н) отвечает требованиям ГОСТ по предъявленным в технических условиях показателям и может быть использован для изготовления поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Сформулированы основные требования, которым должны отвечать полимерные кронштейны воздушных ЛЭП 6–10 кВ.

2 РАЗРАБОТКА МЕТОДИК РАСЧЕТА МЕХАНИЧЕСКОЙ И ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

Обзор исследований в области применения поддерживающих конструкций для воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ показал, что перспективным направлением является повышение надежности не отдельных элементов (кронштейнов, изоляторов, арматуры и т. д.), а всей конструкции в целом, что обеспечивается использованием современных полимерных материалов.

Полимерный кронштейн представляет собой комплексную поддерживающую конструкцию, которая должна воспринимать механические нагрузки и обеспечивать электрическую прочность. Из проведенных теоретических и практических исследований, представленных в первой главе диссертационной работы, определено, что стеклопластик профильный электроизоляционный СПП–ЭИ(Н) может быть использован как материал для изготовления полимерного кронштейна воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Однако вопросы механической и электрической прочности требуют более детального рассмотрения, создания принципов расчета, на основании которых можно сформулировать требования по эксплуатации кронштейна в гололедных и ветровых районах, а также в зонах, различных по степени загрязнения.

Результаты, полученные на основе разработанных методик расчета механической и электрической прочности, позволят дать рекомендации при проектировании и оформлении нормативно-технической документации на новый вид поддерживающей конструкции – полимерный кронштейн для воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

2.1 Разработка методики расчета механической прочности полимерного кронштейна

2.1.1 Анализ особенностей и направления решений при разработке методики расчета механической прочности полимерного кронштейна

Конструкции, выполненные из полимерных материалов, обладают хорошими механическими свойствами на растяжение, сжатие, кручение, но при этом являются довольно гибкими. Это обусловлено относительно небольшим значением модуля упругости $E = 40000$ МПа [99] в сравнении с металлом (сталь 245), у которого $E = 200000$ МПа [99]. Таким образом, жесткость конструкции обеспечивается за счет увеличения площади поперечного сечения профиля, диаметра траверсы. При этом полимерный кронштейн должен отвечать требованиям [109], так как увеличение диаметра ведет к снижению электрической прочности траверсы, а следовательно, к увеличению межфазных расстояний. При этом полимерный кронштейн должен удовлетворять технико-экономическим показателям.

В связи с этим в разрабатываемой методике необходимо оценить:

1. Прочность полимерного кронштейна при влиянии статических и динамических нагрузок:

- величину прогиба конструкции;
- прочность при варьировании расстояния точки крепления тяги относительно точки крепления второго провода;
- возможность унификации конструкции.

2. Прочностные характеристики полимерных кронштейнов в гололедных и ветровых районах.

2.1.2 Определение механической прочности полимерного кронштейна при влиянии статических и динамических нагрузок

Используя законы теоретической механики [11, 48, 124] и законы сопротивления материалов действию внешних сил [125], определение механической прочности полимерного кронштейна выполняется по следующей методике:

1. Устанавливаются граничные (нормативные) и начальные условия. К начальным условиям относятся основные размеры, физико-геометрические характеристики: диаметры тяги (d_1) и траверсы (d_2), модуль упругости (E). Соответственно для k -го диаметра определены: площадь поперечного сечения (A_k), момент инерции (J_{xk}), момент сопротивления сечения (W_{xk}), жесткость стержня (T_k).

2. Задаются результирующие нагрузки в диапазоне приложения сил тяжести от каждого провода $G_i = 2,0 \div 3,0$ кН и воздействия сил аэродинамического сопротивления $F_{rw} = 30 \% \div 100 \%$ от G_i .

3. Составляется схема и определяются реакции, возникающие в конструкции.

4. Рассчитываются сосредоточенные моменты, приложенные в точке подвеса проводов на траверсе.

5. Определяются прогибы в сечениях траверсы.

6. Вычисляются перерезывающие силы и изгибающие моменты, определяется наибольший изгибающий момент.

7. Находятся изгибающие напряжения при статической и динамической нагрузках.

8. Определяются эквивалентные напряжения при статической и динамической нагрузках.

9. Выполняется сравнение полученных величин с граничными значениями.

Приведенная методика основана на известных научных положениях, при этом ее структура имеет научное значение, так как поэтапное соблюдение расчета

позволяет определить механическую прочность новой конструкции – полимерного кронштейна [126].

На основании проведенных исследований применения стеклопластика [99, 126] определено, что тяга, работающая на растяжение, является достаточно прочным элементом поддерживающей конструкции, поэтому ее диаметр принимается $d = 25$ мм, соответственно механическая прочность кронштейна будет характеризоваться прочностью траверсы, а именно удовлетворению требований по напряжению $\sigma_{\text{эквд}} \leq \sigma_{\text{доп}}$ и прогибу $\delta \leq 1/150$ длины элемента. С учетом соотношения диаметра и удельной поверхностной проводимостью (увеличение диаметра ведет к снижению электрической прочности траверсы), в расчете диаметр траверсы принят $d = 64$ мм.

На основании технических условий [104] модуль упругости $E = 40000$ МПа.

Площадь поперечного сечения и момент инерции определяются по формулам из [125]. Жесткость стержня обозначим через T :

$$T = E \cdot j_{xk}. \quad (2.1)$$

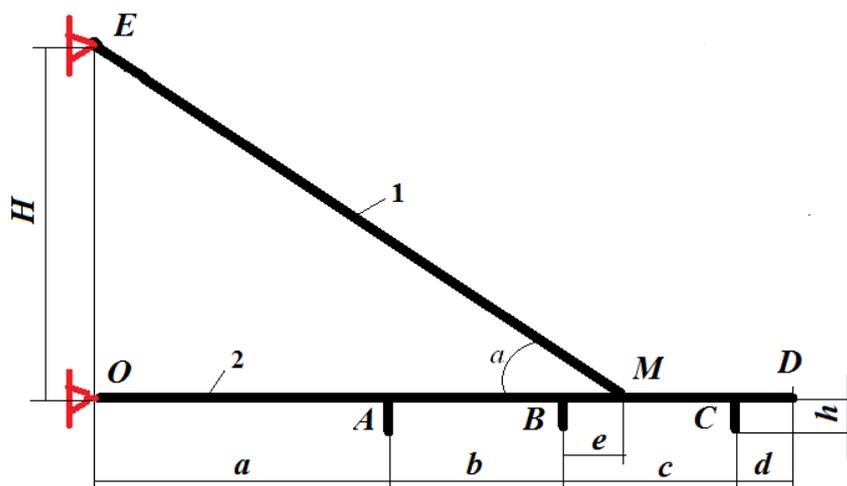
где j_{xk} – момент инерции для k -го диаметра (траверсы или тяги), $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Момент сопротивления сечения траверсы изгибу:

$$W_{xk} = 10^{-12} \cdot \frac{\pi \cdot d_k^3}{32}, \quad (2.2)$$

где d_k – k -й диаметр, мм.

Применив справочные материалы металлических кронштейнов, для расчета механической прочности полимерного кронштейна с одной тягой составляется схема (рисунок 2.1) с указанием размеров и точек действия нагрузок.



1 – тяга; 2 – траверса

Рисунок 2.1 – Схема кронштейна

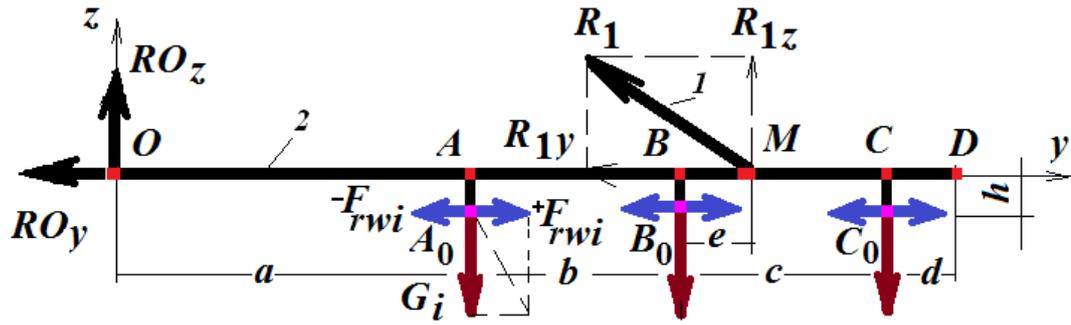
На рисунке 2.1 кронштейн крепится к опоре в точках O и E , OD – траверса 2, EM – тяга 1, A, B, C , – точки крепления проводов или точки действия нагрузок силы тяжести проводов соответственно G_1, G_2, G_3 . Основные размеры и величины сил тяжести представлены в таблице 2.1.

Таблица 2.1 – Основные размеры и величины сил тяжести

a , м	b , м	e , м	c , м	d , м	H , м	h , м	G_i , кН	α , °
1,1	0,65	0,22	0,65	0,1	0,825	0,1	2,0	22,723

Нагрузки задаются в соответствии с [90] в диапазоне приложения сил тяжести от каждого провода $G_i = 2,0 \div 3,0$ кН и воздействии сил аэродинамического сопротивления $F_{rw} = 30 \% \div 100 \%$ от G_i . Значения результирующей нагрузки определяются по формуле (1.2) и принимаются по таблице 1.2.

Для того чтобы оценить аналитическую величину воздействия сил на кронштейн, составляется схема реакций, возникающих в конструкции (рисунок 2.2).



G_i – силы тяжести каждого i -го провода ($i = 1, 2, 3$); F_{rwi} – сила аэродинамического сопротивления; R_1 – реакция наклонно расположенной тяги; R_{1y} – проекция реакции тяги на ось O_y ; R_{1z} – проекция реакции тяги на ось O_z ; RO_y – проекция реакции опоры O траверсы на ось O_y ; RO_z – проекция реакции опоры O траверсы на ось O_z

Рисунок 2.2 – Схема реакций, возникающих в конструкции

$$R_{1z} = \frac{1}{OM} \cdot [G_1 \cdot a + G_2 \cdot (a + b) + G_3 \cdot (a + b + c) \pm 3 \cdot F_{rv} \cdot h]; \quad (2.3)$$

$$RO_z = G_1 + G_2 + G_3 - R_{1z}; \quad (2.4)$$

$$R_{1y} = \frac{R_{1z}}{\tan(\alpha)}; \quad (2.5)$$

$$R_1 = \sqrt{R_{1y}^2 + R_{1z}^2}; \quad (2.6)$$

$$RO_y = F_{rw1} + F_{rw2} + F_{rw3} - R_{1y}; \quad (2.7)$$

$$RO_{1y} = |RO_y|; \quad (2.8)$$

$$RO_1 = \sqrt{RO_y^2 + RO_z^2}. \quad (2.9)$$

Далее, используя метод начальных параметров [124], производится расчет по вычислению прогиба и углов поворота в различных точках сечения траверсы.

Определяются сосредоточенные моменты, приложенные в точках подвеса проводов на траверсе:

$$M_1 = F_{rw} \cdot h; \quad (2.10)$$

$$M_2 = M_3 = M_1. \quad (2.11)$$

Начальный прогиб траверсы, при $y = a+b+e$:

$$\Theta O = \frac{-1}{T \cdot y} \left[M_1 \cdot \frac{(a-y)^2}{2} + M_2 \cdot \frac{[y-(a+b)^2]}{2} + RO_z \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)^3]}{6} \right]. \quad (2.12)$$

Прогиб и угол поворота в сечении А траверсы, при $y = a$:

$$Z_A = \Theta O \cdot y + \frac{1}{T} \cdot \left(RO_z \cdot \frac{y^3}{6} \right); \quad (2.13)$$

$$\Theta A = \Theta O + \frac{1}{T} \cdot \left(RO_z \cdot \frac{y^2}{2} \right). \quad (2.14)$$

Прогиб и угол поворота в сечении В траверсы, при $y = a+b$:

$$Z_B = \Theta O \cdot y + \frac{1}{T} \cdot \left(M_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} + RO_z \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} \right); \quad (2.15)$$

$$\Theta B = \Theta O + \frac{1}{T} \cdot \left(M_1 \cdot (y-a) + RO_z \cdot \frac{y^2}{2} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} \right). \quad (2.16)$$

Прогиб и угол поворота в сечении С траверсы, при $y = a+b+c$:

$$Z_C = \Theta O \cdot y \frac{1}{T} \left[\begin{array}{l} M_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} + RO_z \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} \cdot M_2 \cdot \frac{[y-(a+b)^2]}{2} - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)^3]}{6} \\ + R_{Iz} \cdot \frac{[y-(a+b+e)^3]}{6} \end{array} \right]; \quad (2.17)$$

$$\Theta C = \Theta O + \frac{1}{T} \left[\begin{array}{l} M_1 \cdot (y-a)^2 + RO_z \cdot \frac{y^2}{2} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} \cdot M_2 \cdot [y-(a+b)] - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)^2]}{2} \\ + R_{Iz} \cdot \frac{[y-(a+b+e)^2]}{2} \end{array} \right]. \quad (2.18)$$

Необходимо выполнить проверку $zM=0$, при этом $y = a+b+e$:

$$Z_M = \Theta O \cdot y \frac{1}{T} \left[M_1 \cdot \frac{(y-a)^2}{2} + RO_z \cdot \frac{y^3}{6} - G_1 \cdot \frac{(y-a)^3}{6} \cdot M_2 \cdot \frac{[y-(a+b)^2]}{2} - G_2 \cdot \frac{[y-(a+b)^3]}{6} \right]. \quad (2.19)$$

Производится вычисление расчетного напряжения при растяжении тяги:

$$\sigma_p = \frac{R_1}{A_1}, \quad (2.20)$$

где A_1 – площадь поперечного сечения тяги, (m^2).

Расчетное напряжение при статической нагрузке не должно превышать допустимое значение согласно [113, 114] $\sigma_{доп} = 800 \text{ МПа}$ или $\sigma_{доп} = 80 \cdot 10^3 \text{ кПа}$.

При воздействии динамической нагрузки напряжение при растяжении находится:

$$\sigma_{pd} = \frac{k_d \cdot R_1}{A_1}, \quad (2.21)$$

где k_d – коэффициент динамической нагрузки (учет внезапного возникновения вертикальных и поперечных колебаний проводов).

Расчетное напряжение при растяжении с учетом динамической нагрузки должно быть меньше $\sigma_d = 60 \cdot 10^3$ кПа, т. е. в 1,3 раза меньше, чем при воздействии допустимого значения статической нагрузки $\sigma_{\text{доп}}$ [113, 114].

Аналогично производится расчет на прочность траверсы, работающей на сжатие при статической и динамической нагрузках:

$$\sigma_{\text{сж}} = \frac{RO_{1Y}}{A_2}, \quad (2.22)$$

где A_2 – площадь поперечного сечения траверсы, (м^2).

$$\sigma_{\text{сжд}} = \frac{k_d \cdot RO_{1Y}}{A_2}. \quad (2.23)$$

Расчетное напряжение при сжатии траверсы при статической нагрузке не должно превышать $\sigma_{\text{сжд}} = 250$ МПа или $\sigma_{\text{сжд}} = 25 \cdot 10^3$ кПа. С учетом динамической нагрузки $\sigma_{\text{сжд}} \leq 19 \cdot 10^3$ кПа [114, 115].

Производится вычисление перерезывающей силы и изгибающего момента. Кронштейн делится на четыре участка, как показано на рисунке 2.3.

Первый участок перерезывающей силы находится как:

$$Q_{Z1}(y_1) = RO_Z, \quad (2.24)$$

где y_1 – принимается равным a , (м).

Изгибающий момент (как внутренний силовой фактор), определяется:

$$M_{Z1}(y_1) = RO_Z \cdot y_1; \quad (2.25)$$

$$M_{Z1}(y_1) = RO_Z \cdot a; \quad (2.26)$$

$$M_{Z1}(y_0) = 0, \quad (2.27)$$

где $y_0 = 0$.

Второй участок:

$$Q_{Z2}(y_2) = RO_Z - G_1, \quad (2.28)$$

где y_2 – принимается равным b , (м).

$$M_{Z2}(y_2) = RO_Z \cdot (a + y_2) - G_1 \cdot y_2 - M_1; \quad (2.29)$$

$$M_{Z2}(y_0) = RO_Z \cdot a - M_1, \quad (2.30)$$

где $y_0 = 0$.

$$M_{Z2}(y_2) = RO_Z \cdot (a + b) - G_1 \cdot b - M_1. \quad (2.31)$$

Третий участок:

$$Q_{Z3}(y_3) = RO_Z - G_1 - G_2, \quad (2.32)$$

где y_3 – принимается равным e , (м).

$$M_{Z3}(y_3) = RO_Z \cdot (a + b + y_3) - G_1 \cdot (b + y_2) - M_1 - G_2 \cdot y_3 - M_2; \quad (2.33)$$

$$M_{Z3}(y_3) = RO_Z \cdot (a + b + e) - G_1 \cdot (b + e) - M_1 - G_2 \cdot e - M_2; \quad (2.34)$$

$$M_{Z3}(y_0) = RO_Z \cdot (a + b) - G_1 \cdot b - M_1 - M_2, \quad (2.35)$$

где $y_0 = 0$.

Четвертый участок:

$$Q_{Z4}(y_4) = G_3, \tag{2.36}$$

где y_4 – принимается равным $c - e$, (м).

$$M_{Z4}(y_3) = - G_3 \cdot y_4 + M_3; \tag{2.37}$$

$$M_{Z4}(y0_3) = M_3, \tag{2.38}$$

где $y0_4=0$.

$$M_{Z4}(y_3) = - G_3 \cdot (c - e) + M_3. \tag{2.39}$$

На основании расчета строятся схема приложения сил на кронштейн, эпюры перерезывающих сил и изгибающего момента в сечении траверсы, которые представлены на рисунке 2.3.

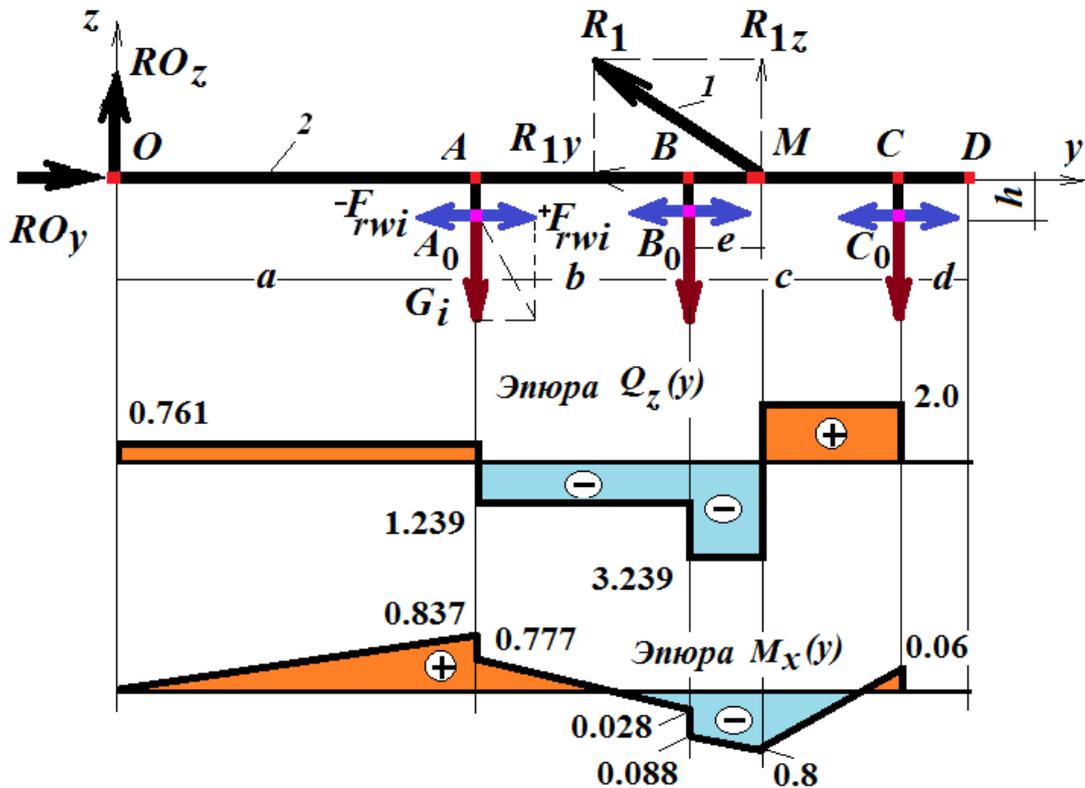


Рисунок 2.3 – Схема приложения сил, эпюры перерезывающих сил и изгибающего момента

Выполнен расчет на прочность траверсы, работающей на изгиб со сжатием.

Определяется наибольший изгибающий момент, который появляется в точке А подвеса первого провода

$$M_{\max} = M_{Z1}(y_1). \quad (2.40)$$

Изгибающее напряжение в сечении траверсы от воздействия изгибающего момента при статической нагрузке находится по формуле

$$\sigma_{\text{изг}} = \frac{M_{\max}}{W_x}, \quad (2.41)$$

Согласно [114, 115] $\sigma_{\text{изг}}$ не должно превышать допустимого значения $\sigma_{\text{доп}} = 80 \cdot 10^3$ кПа.

Изгибающее напряжение в сечении траверсы от воздействия изгибающего момента при динамической нагрузке определяется:

$$\sigma_{\text{изгд}} = \frac{k_d \cdot M_{\max}}{W_x}. \quad (2.42)$$

При динамической нагрузке $\sigma_{\text{изгд}}$ должно быть в 1,3 раза меньше, чем $\sigma_{\text{доп}}$, т.е. $\sigma_{\text{изгд}} \leq 60 \cdot 10^3$ кПа [114, 115].

Определение эквивалентного напряжения в сечении траверсы при статической нагрузке

$$\sigma_{\text{экр}} = \sigma_{\text{сж}} + \sigma_{\text{изг}}. \quad (2.43)$$

Значение эквивалентного напряжения при статической нагрузке должно удовлетворять соотношению $\sigma_{\text{экр}} \leq \sigma_{\text{доп}}$, т. е. $\sigma_{\text{экр}} \leq 80 \cdot 10^3$ кПа [114, 115].

Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при динамической нагрузке определяется:

$$\sigma_{\text{эквд}} = \sigma_{\text{сжд}} + \sigma_{\text{изгд}}. \quad (2.44)$$

Значение эквивалентного напряжения при динамической нагрузке должно удовлетворять условию $\sigma_{\text{эквд}} \leq \sigma_{\text{доп}} / 1,3$; т. е. $\sigma_{\text{эквд}} \leq 60 \cdot 10^3$ кПа [114, 115].

Используя начальные условия $G_i = 2,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i [90], по формулам (2.20–2.23, 2.41–2.44) производятся расчеты напряжений, полученные данные сводятся в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Напряжения, возникающие в тяге и траверсе полимерного кронштейна, при начальных условиях

σ_p , МПа	$\sigma_{рд}$, МПа	$\sigma_{сж}$, МПа	$\sigma_{сжд}$, МПа	$\sigma_{изг}$, МПа	$\sigma_{изгд}$, МПа	$\sigma_{\text{экв}}$, МПа	$\sigma_{\text{эквд}}$, МПа
27,63	35,92	3,329	4,328	32,54	42,31	35,87	46,64

По представленной методике, используя программный продукт *Mathcad* [127], производится расчет прочности полимерного кронштейна при вариации расстояния (e) точки крепления тяги к траверсе. По полученным результатам расчета строятся графики зависимостей (рисунки 2.4–2.14).

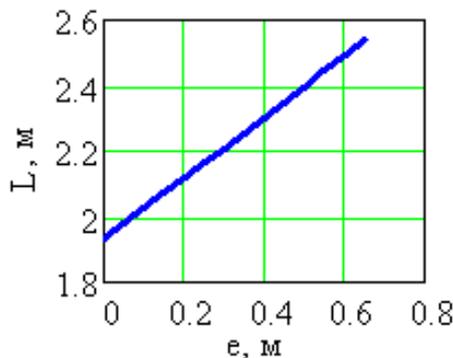


Рисунок 2.4 – Зависимость длины тяги от расстояния (e)

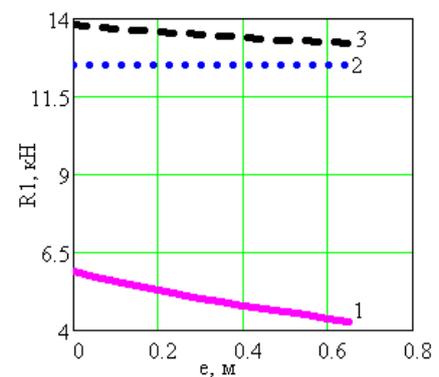


Рисунок 2.5 – Проекция реакции в тяге: 1 – по оси Oz ; 2 – по оси Oy ; 3 – наклонно расположенной тяги

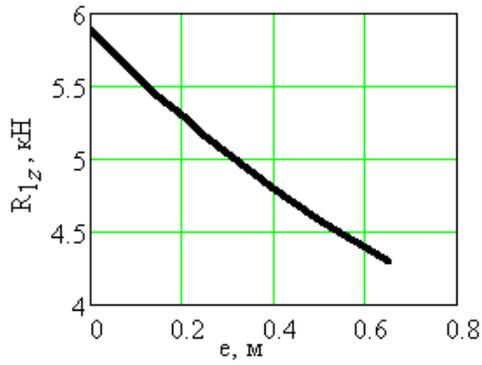


Рисунок 2.6 – Проекция реакции тяги по оси Oz

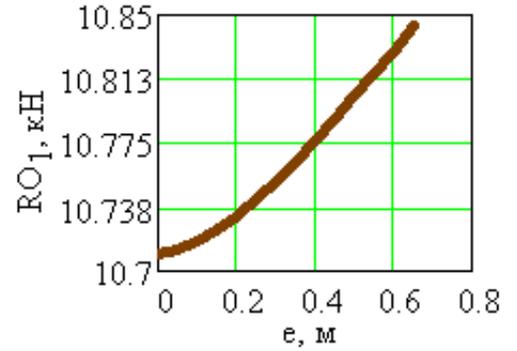


Рисунок 2.9 – Реакция опоры на траверсу

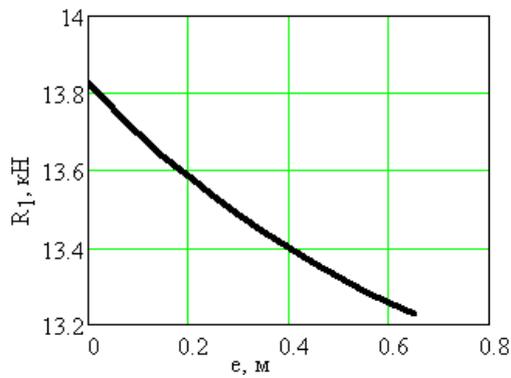


Рисунок 2.7 – Реакция в тяге

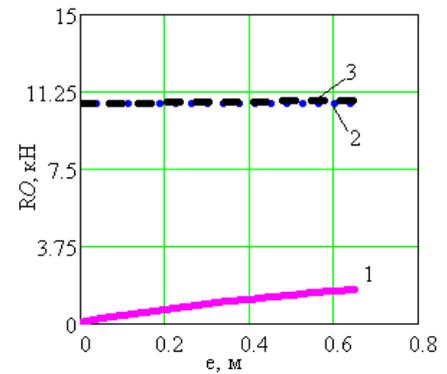


Рисунок 2.10 – Проекция реакций опоры на траверсу: 1 – по оси Oz ; 2 – по оси Oy ; 3 – реакция опоры

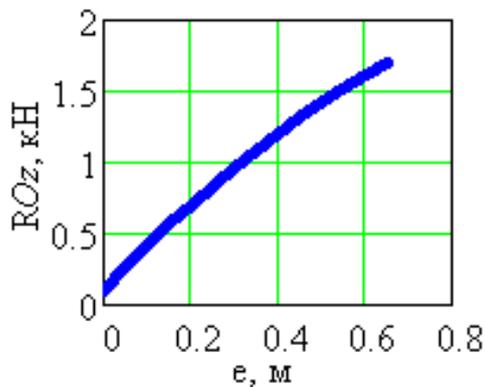


Рисунок 2.8 – Проекция реакции опоры на траверсу по оси Oz

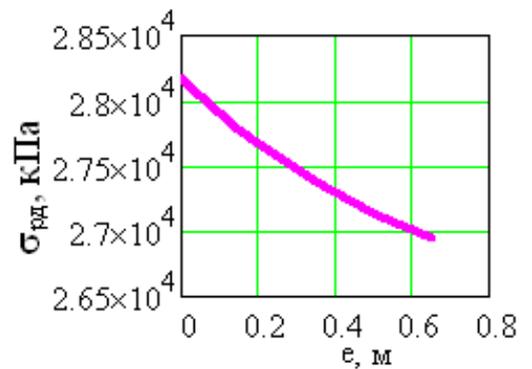


Рисунок 2.11 – Расчетное напряжение растяжения тяги при статической нагрузке

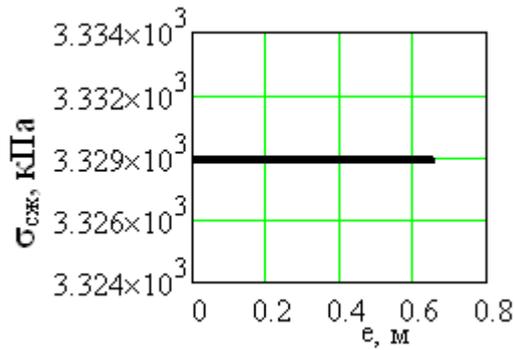


Рисунок 2.12 – Расчетное напряжение сжатия траверсы при статической нагрузке

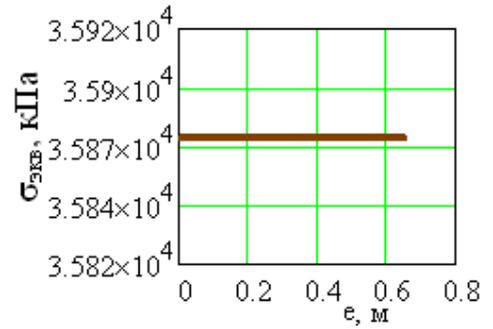


Рисунок 2.13 – Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при статической нагрузке

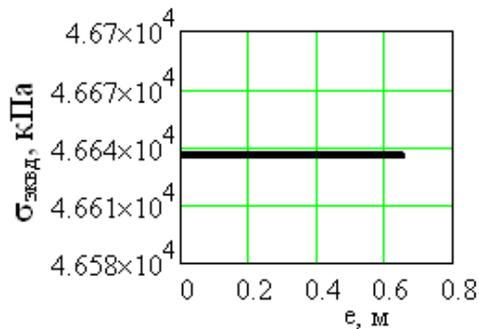


Рисунок 2.14 – Эквивалентное динамическое напряжение в сечении траверсы

Прогиб траверсы δ (мм) при изменении сил тяжести проводов G_i и $F_{rw} = 30\%$ от G_i представлен в таблице 2.3 и на рисунке 2.15.

Так как нагрузка от силы тяжести проводов и аэродинамических сил может изменяться в зависимости от атмосферных условий, на основании изложенной методики расчета и используя метод конечных элементов производится расчет кронштейна на прочность в пределах действия силы тяжести от $G_i = 2,0; 2,1; 2,2 \dots 3,0$ кН и в пределах действия силы аэродинамического сопротивления $F_{rw} = 30\%; 40\%; 50\% \dots 100\%$ от G_i (таблица 2.4). По полученным результатам строится диаграмма зависимости (рисунок 2.16).

Таблица 2.3 – Прогиб траверсы δ (мм) в зависимости от сил тяжести проводов G_i при $F_{rw} = 30\%$ от G_i

G_i , кН	Точки схемы кронштейна/расстояние от опоры, мм					
	О	А	В	М	С	Д
	0	1100	1750	1970	2400	2500
G=2,0	0	-7,94	-2,50	0,00	3,70	3,80
G=2,1	0	-8,34	-2,68	0,00	3,94	4,04
G=2,2	0	-8,74	-2,80	0,00	4,13	4,23
G=2,3	0	-9,139	-2,93	0,00	4,313	4,41
G=2,4	0	-9,536	-3,058	0,00	4,50	4,60
G=2,5	0	-9,934	-3,185	0,00	4,688	4,79
G=2,6	0	-10	-3,312	0,00	4,875	4,98
G=2,7	0	-11	-3,44	0,00	5,063	5,16
G=2,8	0	-11	-3,567	0,00	5,25	5,35
G=2,9	0	-12	-3,695	0,00	5,438	5,54
G=3	0	-12	-3,822	0,00	5,625	5,73

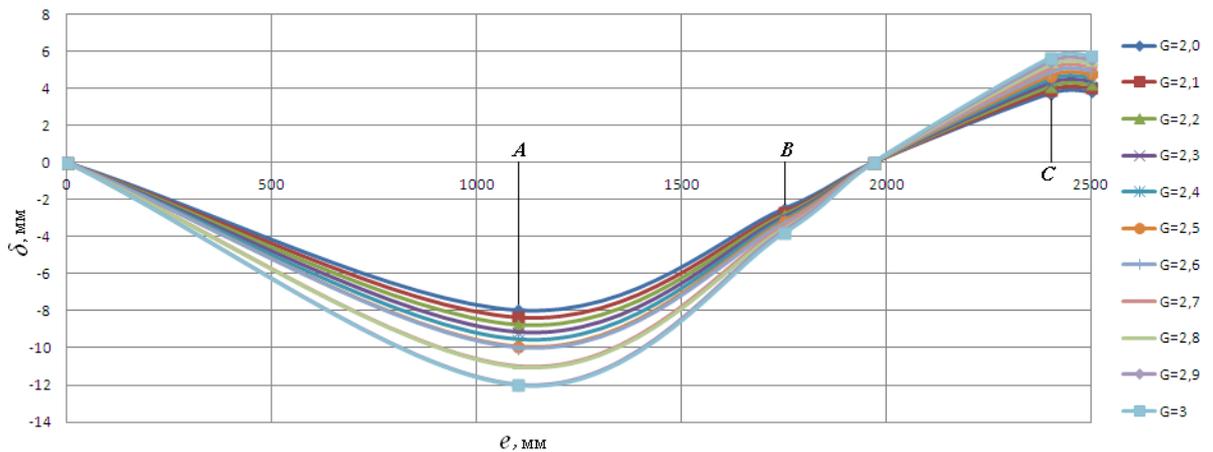


Рисунок 2.15 – Изменение прогиба траверсы в зависимости от сил тяжести проводов $G_i = 2,0$ кН при $F_{rw} = 0,3$

Таблица 2.4 – Эквивалентное динамическое напряжение ($\sigma_{\text{эквд}}$), МПа

G_i , кН	Аэродинамическое сопротивление F_{rwi} , % от G_i							
	30	40	50	60	70	80	90	100
2,00	46,61	48,06	49,48	50,9	52,32	53,74	55,16	56,58
2,10	48,97	50,46	51,95	53,44	54,93	56,42	57,92	59,41
2,20	51,3	52,86	54,42	55,99	57,55	59,11	60,67	62,24
2,30	53,63	55,26	56,9	58,53	60,16	61,8	63,43	65,07
2,40	55,96	57,67	59,37	61,08	62,78	64,49	66,19	67,89
2,50	58,29	60,07	61,85	63,62	65,4	67,17	68,95	70,72

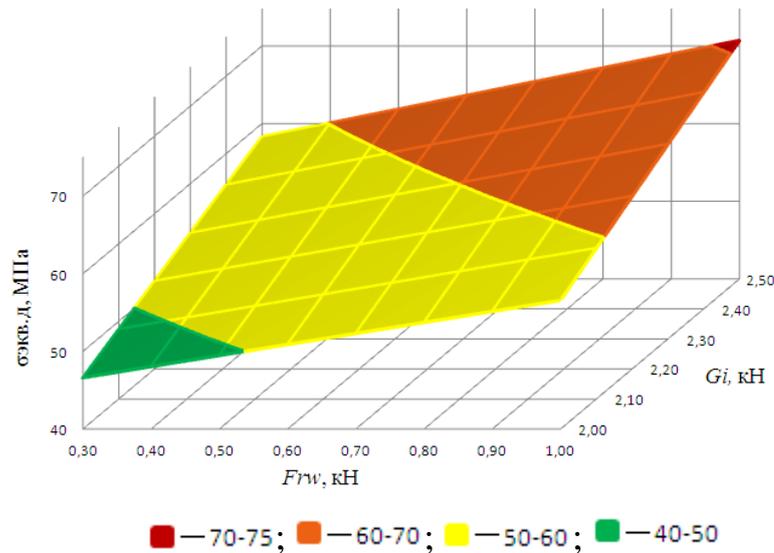


Рисунок 2.16. Эквивалентное динамическое напряжение в сечении траверсы при изменении сил тяжести проводов G_i и сил аэродинамического сопротивления F_{rw}

На основании результатов выполненных расчетов следует, что прочность кронштейна, выполненного из стеклопластикового профиля [104] круглого сечения траверсы $d = 64$ мм и тяги $d = 25$ мм, будет обеспечена при силе тяжести от каждого провода $G_i = 2,1$ кН и воздействии аэродинамической силы до $F_{rw} = 100\%$ от G_i , при силе тяжести $G_i = 2,5$ кН и воздействии $F_{rw} = 30\%$ от G_i .

Также отмечено, что при варьировании расстояния точки крепления тяги к траверсе прочность конструкции обеспечена. Воздействия статической и динамической нагрузок не превышают допустимых значений, согласно [113–115]. Прогиб траверсы при $G_i = 2,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i составляет 8 мм, что соответствует [48] и не превышает соотношение 1/150.

Для подтверждения сходимости результатов, разработанной методики расчета создается двухмерная модель полимерного кронштейна с одной тягой (рисунок 2.17) в программе «POLUS v.2.1.1» [103]. Для расчета задаются физико-геометрические характеристики: размеры кронштейна, точки приложения нагрузок и фиксации стержней; свойства стержней (материал); нагрузки, действующие на кронштейн от сил тяжести проводов G_i и сил аэродинамического сопротивления F_{rw} (см. рисунок 2.17).

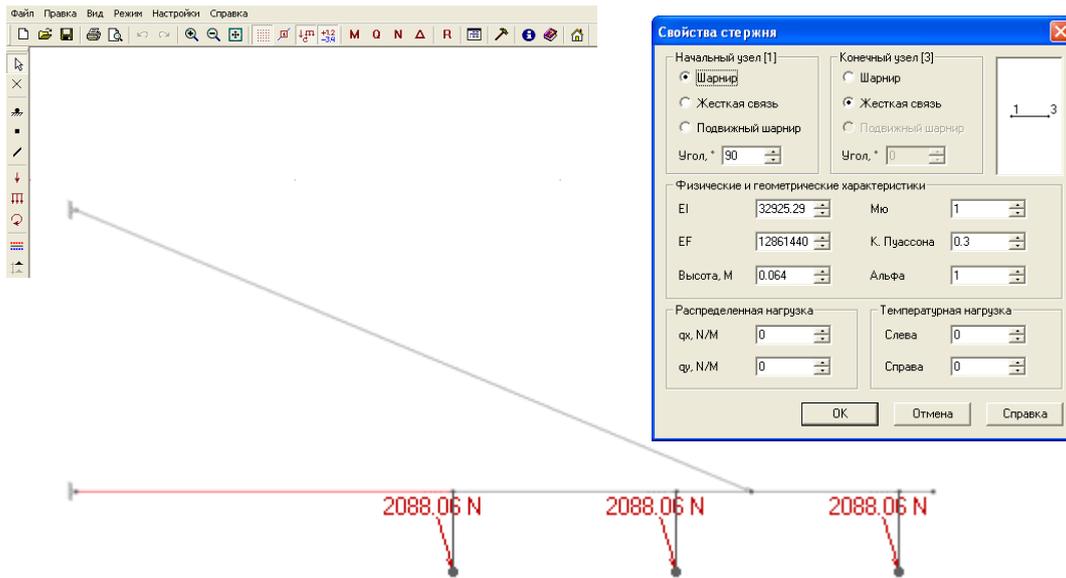


Рисунок 2.17 – Модель полимерного кронштейна в программе «POLUS v.2.1.1»

На рисунках 2.18 – 2.20 представлены эпюры изгибающего момента (M , Н·м), продольных сил (Q , Н), схема перемещений (Δ , мм).

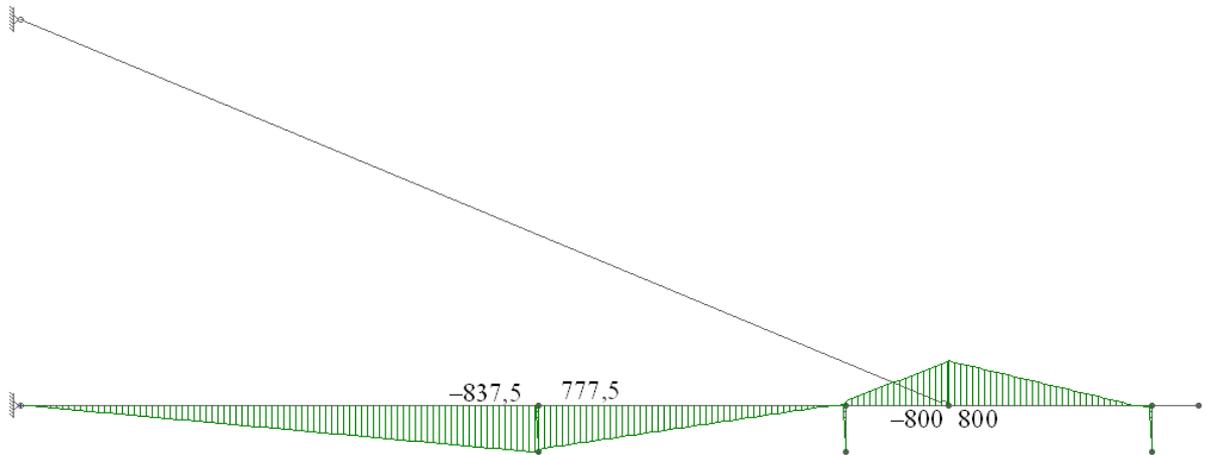


Рисунок 2.18 – Эпюра изгибающего момента

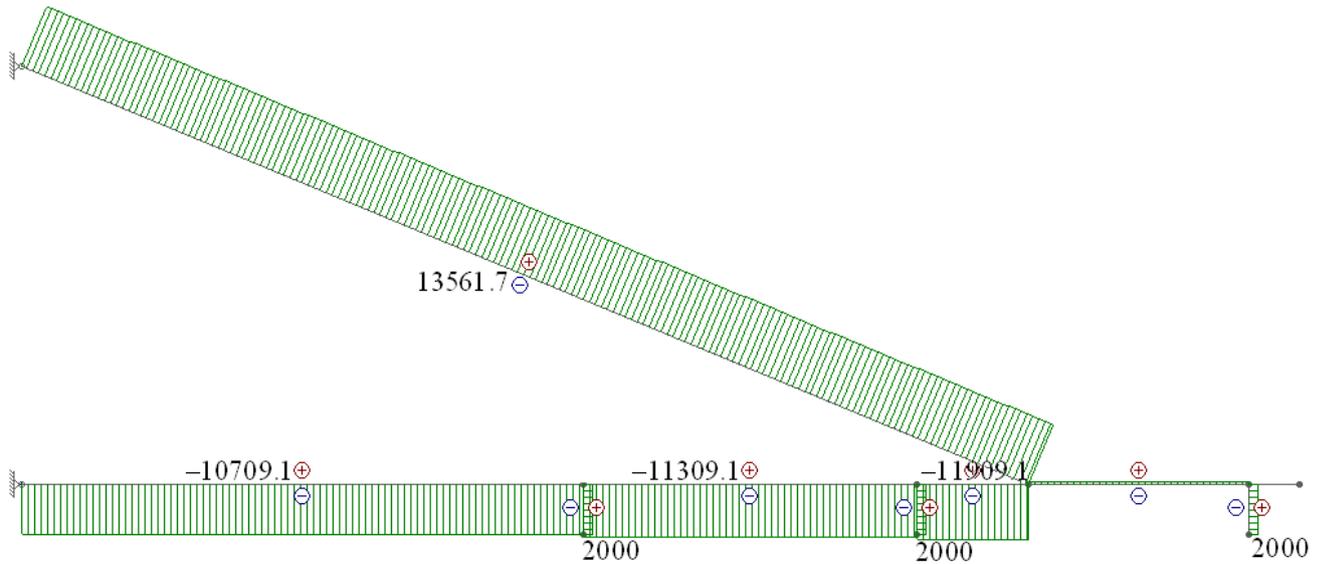


Рисунок 2.19 – Эпюра продольных сил

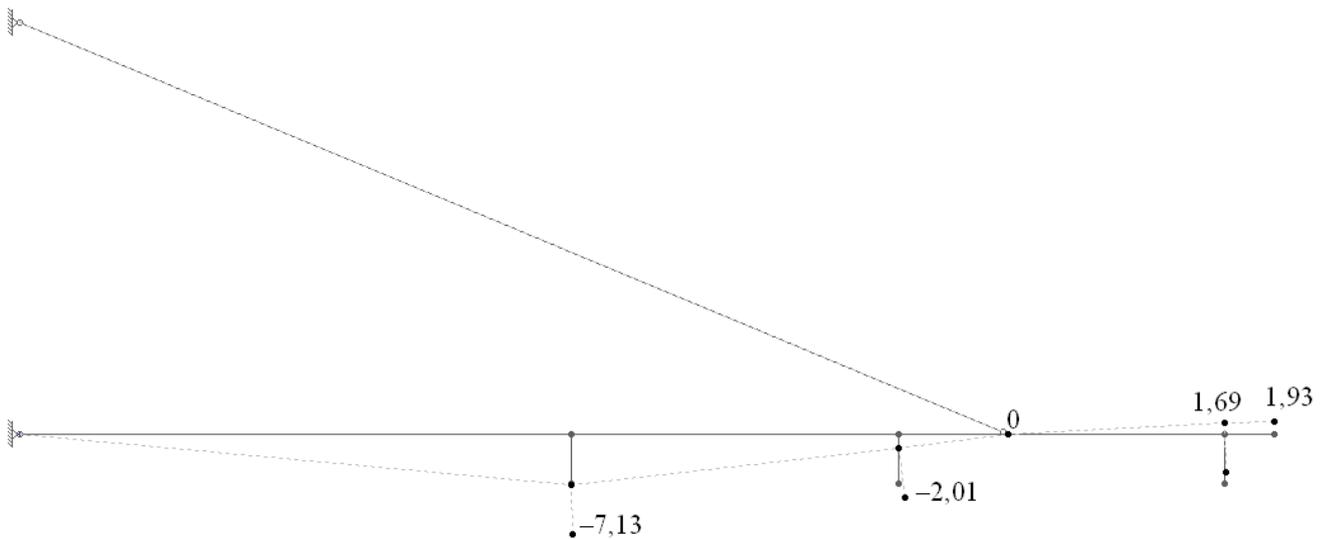


Рисунок 2.20 – Схема перемещений

Моделируя процесс приложения нагрузок от сил тяжести проводов G_i и сил аэродинамического сопротивления F_{rw} на кронштейн в программе «POLUS v.2.1.1» и используя метод конечных элементов в программном продукте *Microsoft Office Excel*, определяются значения прогиба траверсы (таблица 2.5, рисунок 2.21) и эквивалентного динамического напряжения (таблица 2.6, рисунок 2.22).

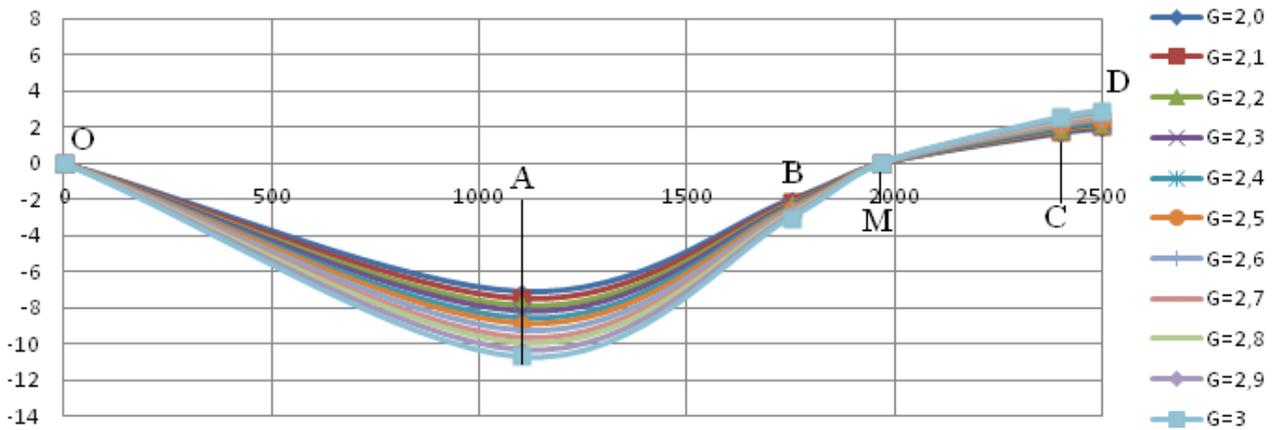


Рисунок 2.21 – Изменение прогиба траверсы в зависимости от сил тяжести проводов $G_i = 2,0$ кН при $F_{rw} = 0,3$ от G_i по расчетам в программе «POLUS v.2.1.1»

Таблица 2.5 – Прогиб траверсы δ (мм) в зависимости от сил тяжести проводов G_i при $F_{rw} = 30\%$ от G_i

G_i , кН	Точки схемы кронштейна/расстояние от т.О, мм					
	О	А	В	М	С	Д
	0	1100	1750	1970	2400	2500
G=2,0	0	-7,13	-2,01	0,00	1,69	1,93
G=2,1	0	-7,48	-2,11	0,00	1,77	2,03
G=2,2	0	-7,84	-2,21	0,00	1,86	2,12
G=2,3	0	-8,20	-2,31	0,00	1,94	2,22
G=2,4	0	-8,55	-2,41	0,00	2,02	2,32
G=2,5	0	-8,91	-2,51	0,00	2,11	2,41
G=2,6	0	-9,27	-2,62	0,00	2,19	2,52
G=2,7	0	-9,62	-2,72	0,00	2,28	2,61
G=2,8	0	-9,98	-2,82	0,00	2,36	2,70
G=2,9	0	-10,34	-2,92	0,00	2,45	2,80
G=3	0	-10,69	-3,02	0,00	2,53	2,90

Прогиб траверсы при $G_i = 2,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i составляет 7,13 мм, что соответствует требованиям по прогибу [48] и не превышает соотношение 1/150 (16,6 мм). При $G_i = 3,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i составляет 10,69 мм, что также соответствует [48].

Таблица 2.6 – Эквивалентное напряжение ($\sigma_{\text{экв}}$) в сечении траверсы при изменении сил тяжести проводов G_i и сил аэродинамического сопротивления F_{rw} , МПа

G_i , кН	Аэродинамического сопротивления F_{rw} , % от G_i							
	30	40	50	60	70	80	90	100
2,00	46,61	48,06	49,48	50,9	52,32	53,74	55,16	56,58
2,10	48,97	50,46	51,95	53,44	54,93	56,42	57,92	59,41
2,20	51,3	52,86	54,42	55,99	57,55	59,11	60,67	62,24
2,30	53,63	55,26	56,9	58,53	60,16	61,8	63,43	65,07
2,40	55,96	57,67	59,37	61,08	62,78	64,49	66,19	67,89
2,50	58,29	60,07	61,85	63,62	65,4	67,17	68,95	70,72

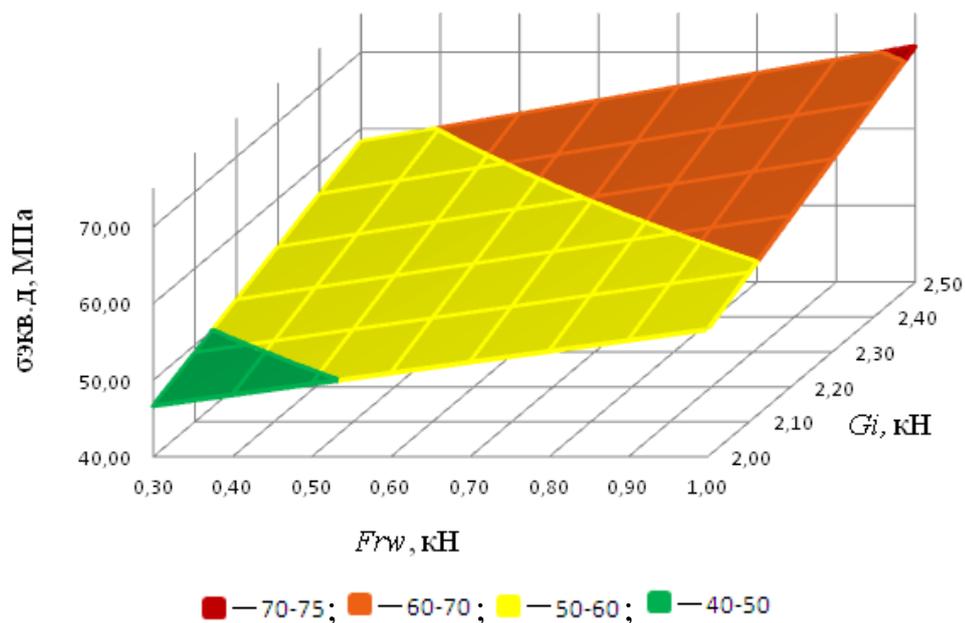


Рисунок 2.22 – Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при изменении сил тяжести проводов G_i и сил аэродинамического сопротивления F_{rw} по расчетам в программе «POLUS v.2.1.1»

По результатам теоретических расчетов (рисунки 2.15, 2.16, таблицы 2.3, 2.4) и расчетной модели кронштейна (рисунки 2.21, 2.22, таблицы 2.5, 2.6) определено, что полученные данные имеют расхождение друг от друга не более 1 %. Таким образом, в диссертационной работе для дальнейших исследований поддерживающих конструкций применяется моделирование в программном комплексе «POLUS v.2.1.1».

Для оценки методики расчета и расширения диапазона применения диаметров тросов и траверс с соблюдением требований прогиба проведены аналогичные расчеты полимерного кронштейна с диаметром траверсы $d = 46$ мм и диаметром троса $d = 25$ мм. Определяются прогиб и эквивалентное динамическое напряжение (рисунки 2.23, 2.24).

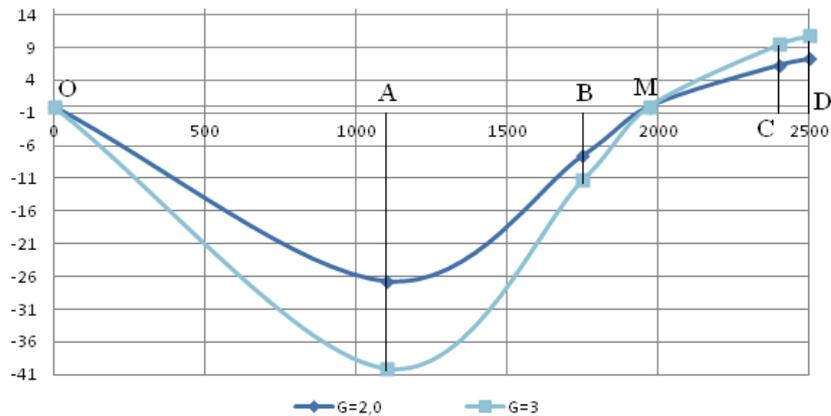


Рисунок 2.23 – Изменение прогиба траверсы в зависимости от сил тяжести проводов $G = 2,0$ кН и $G = 3,0$ кН при $F_{rw} = 30\%$ от G по расчетам в программе «POLUS v.2.1.1»

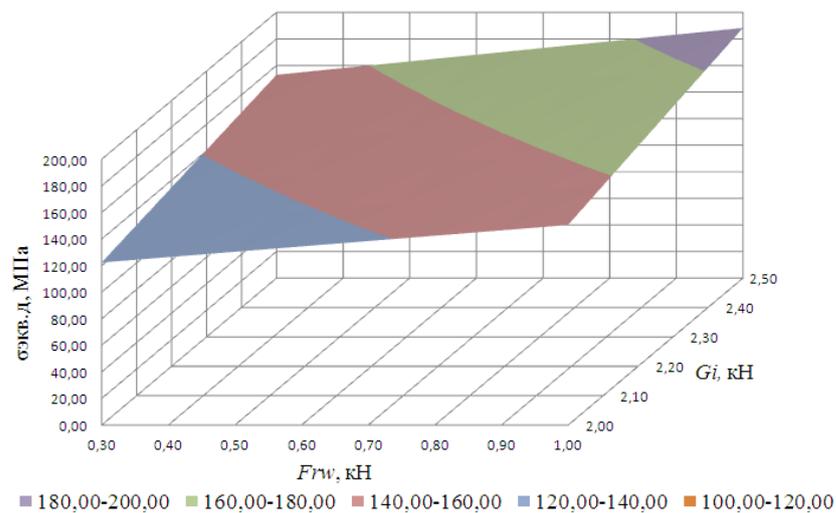


Рисунок 2.24 – Эквивалентное напряжение в сечении траверсы при изменении сил тяжести проводов G_i и сил аэродинамического сопротивления F_{rw} по расчетам с использованием программы «POLUS v.2.1.1»

По проведенным исследованиям (см. рисунки 2.23, 2.24) следует, что кронштейн с одной тягой и траверсой диаметром $d = 46$ мм, при $G_i = 2,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i не соответствует требованиям по прогибу, δ составляет 26,7 мм, что превышает соотношение 1/150 (16,6 мм) [48], а также $\sigma_{\text{эквд}} > \sigma_{\text{доп}}$, что свидетельствует о том, что прочность не обеспечена.

Исходя из положения, что увеличение диаметра траверсы увеличивает удельную поверхностную проводимость, проведен упрощенный технико-экономический анализ использования полимерного кронштейна с траверсой $d = 64$ мм и одной тягой $d = 25$ мм (вариант 1), и кронштейна с траверсой $d = 46$ мм и двумя тягами $d = 25$ мм (вариант 2). На основании прайс-листа цены стеклопластика ООО «ЭлПромТех», с учетом стоимости профиля за 1 метр вариант 1 ≈ 10349 руб., вариант 2 ≈ 6742 руб.

По аналогии с рассмотренными моделями кронштейна с диаметром траверсы $d = 64$ мм и $d = 46$ мм, в программе «POLUS v.2.1.1» строится модель полимерного кронштейна с диаметром траверсы $d = 46$ мм и двумя тягами $d = 25$ мм, на рисунках 2.25–2.27 представлены эпюры изгибающего момента (M , Н·м), продольных сил (Q , Н), схема перемещений (Δ , мм), приложенная нагрузка $G_i = 2,0$ кН и $F_{rw} = 30\%$ от G_i .

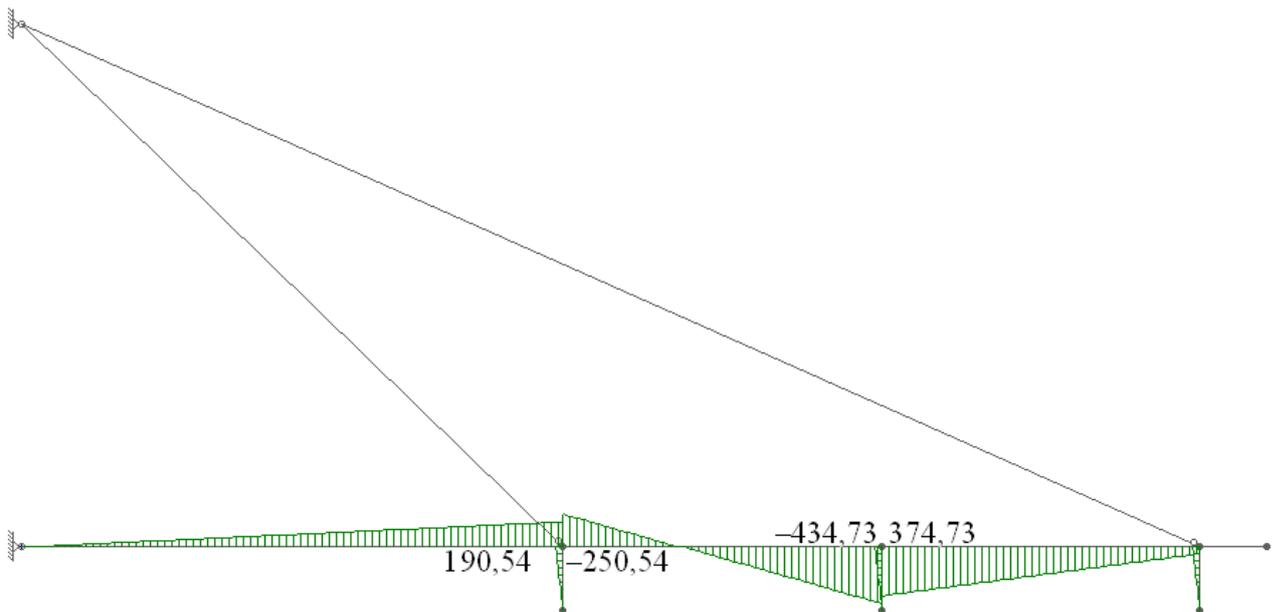


Рисунок 2.25 – Эпюра изгибающего момента кронштейна с двумя тягами

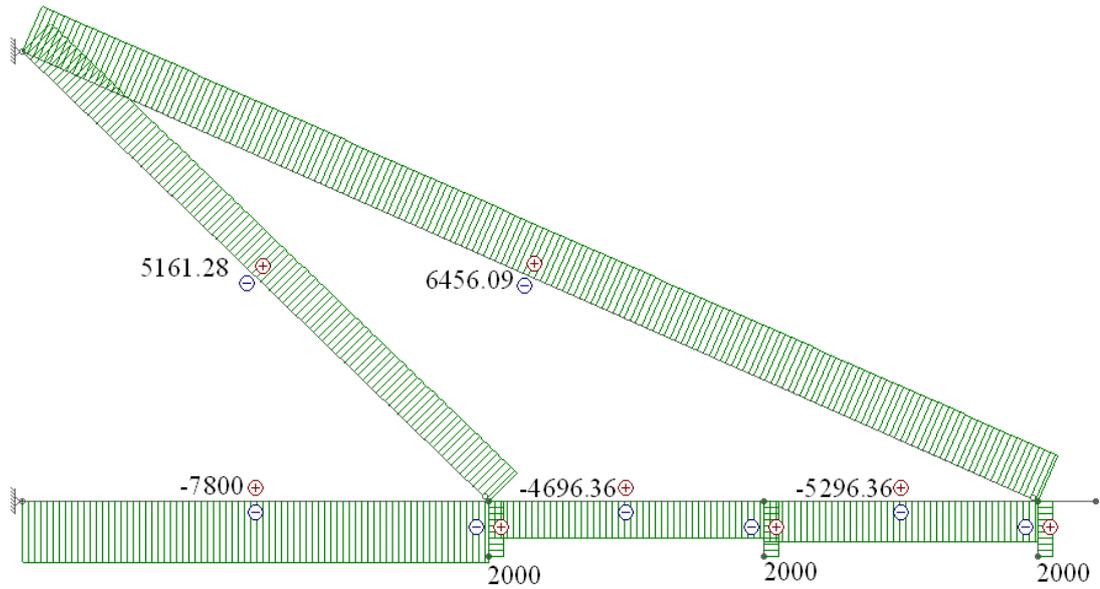


Рисунок 2.26 – Эпюры продольных сил кронштейна с двумя тягами

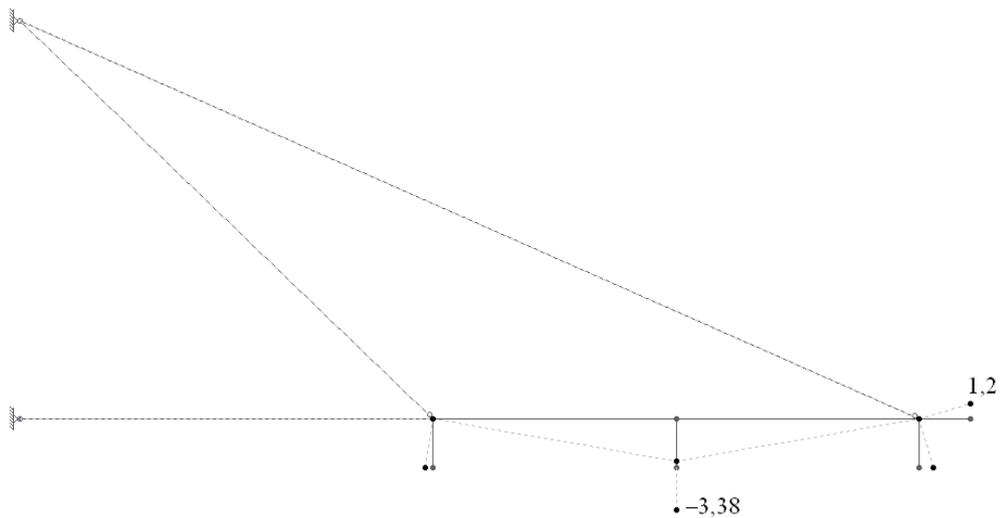


Рисунок 2.27 – Схема перемещений кронштейна с двумя тягами

Ветровая нагрузка, воздействуя на провода, создает в кронштейне упругую деформацию, поэтому в предложенной методике расчета механической прочности полимерного кронштейна необходимо учитывать разнознаковое аэродинамическое сопротивление $\pm F_{rw}$.

При направлении ветра от опоры в формуле (2.3) аэродинамическое сопротивление необходимо принимать со знаком «+», тогда кронштейн работает на растяжение, следовательно, увеличивается прогиб траверсы. Если F_{rw} принять «-»,

что соответствует направлению ветра к опоре, то кронштейн работает на сжатие, при этом несколько больше увеличивается изгибающий момент в точке крепления второго провода, соответственно, увеличивается предельно допустимое значение эквивалентного динамического напряжения. Прогиб траверсы будет иметь значение несколько меньшее, чем при противоположном направлении ветра.

Учитывая вышеизложенное и используя метод конечных элементов, определяются прогиб кронштейна (δ , мм) и эквивалентное динамическое напряжение ($\sigma_{\text{эквд}}$, МПа) при $\pm F_{rw}$ (рисунки 2.28–2.30).

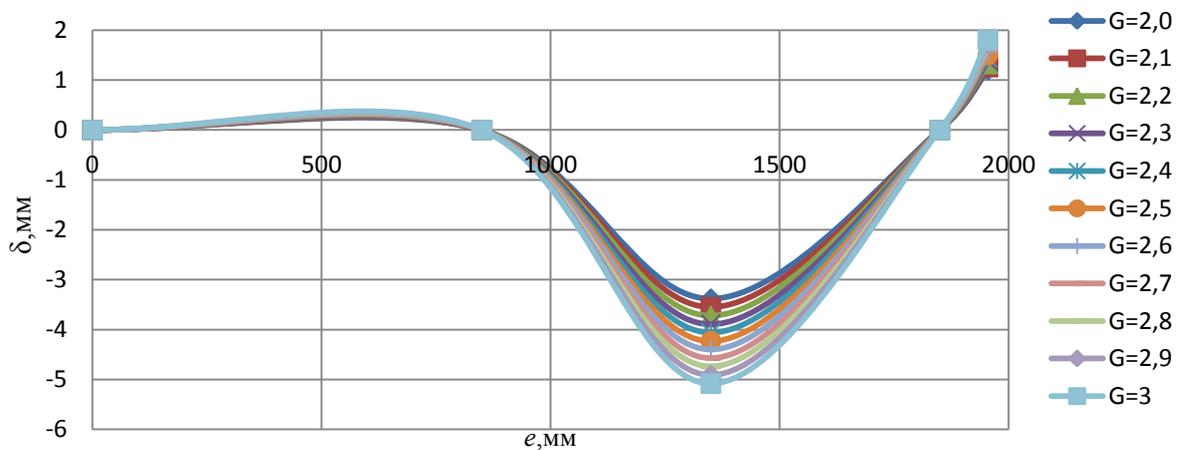


Рисунок 2.28 – Максимальное изменение прогиба траверсы кронштейна с двумя тягами в зависимости от сил тяжести проводов $G = 3,0$ кН при $+F_{rw} = 100\%$ от G

Для определения пределов работы кронштейна на растяжение и сжатие проведены расчеты по определению прогиба траверсы δ мм, при $\pm F_{rw}$ и безветренном положении $F_{rw} = 0$. Полученные результаты имеют линейную зависимость и представлены на рисунке 2.29. По результатам моделирования (см. рисунки 2.28, 2.29) следует, что кронштейн с траверсой диаметром $d = 46$ мм и двумя тягами диаметром $d = 25$ мм при изменении от $G_i = 2,0 \div 3,0$ кН и воздействии аэродинамического сопротивления в пределах $\pm F_{rw} = 30\% \div 100\%$ от G_i , соответствует требованию по прогибу. Максимальное значение δ составляет 5,38 мм, что не превышает соотношение 1/150 (13,03 мм) [48].

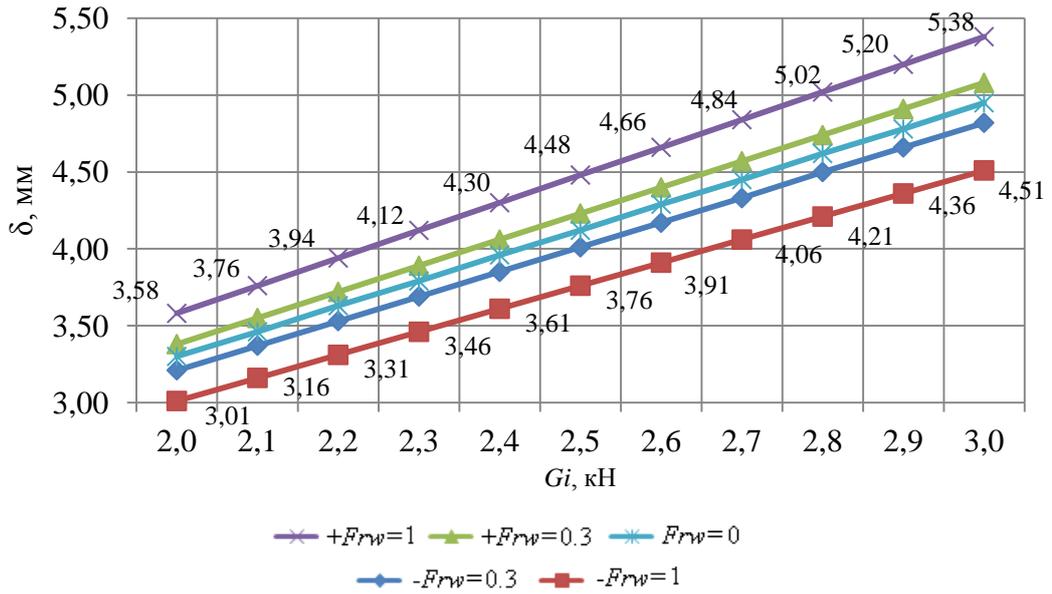


Рисунок 2.29 – Изменение прогиба траверсы кронштейна с двумя тягами в зависимости от сил тяжести проводов G_i кН при $\pm F_{rv}$

Определение допустимого эквивалентного напряжения производится также при разнознаковом воздействии аэродинамического сопротивления $\pm F_{rv}$. Полученные результаты представлены на рисунке 2.30.

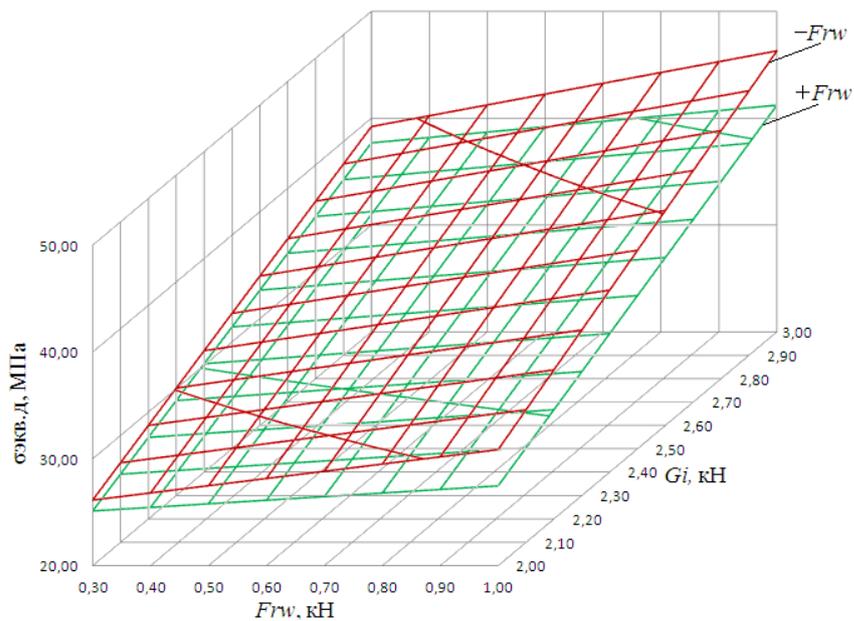


Рисунок 2.30 – Эквивалентное динамическое напряжение в сечении траверсы кронштейна с двумя тягами при изменении G_i и $\pm F_{rv}$

На основании результатов проведенных расчетов можно утверждать, что прочность полимерного кронштейна, выполненного из стеклопластика по [104], диаметром траверсы 46 мм и двумя тягами диаметром 25 мм, будет обеспечена в пределах рассмотренного диапазона приложения сил тяжести от каждого провода $G_i = 2,0 \div 3,0$ кН и воздействии аэродинамической силы $\pm F_{rw} = 30 \div 100$ % от G_i . Воздействия статической и динамической нагрузок не превышают допустимых значений согласно [113–115].

Для визуализации механических процессов, протекающих по конструкции полимерного кронштейна при вертикальной и горизонтальной нагрузках, в программном комплексе *SolidWorks* [88, 89] создана 3D-модель полимерного кронштейна с двумя тягами, в которой задаются параметры материалов, точки фиксации, силы, воздействующие на узлы ($G_i = 3,0$ кН при $\pm F_{rw} = 100$ % от G_i).

На рисунках 2.31–2.32 представлены эпюры перемещения, а на рисунках 2.33 – 2.34 эпюры внутренних напряжений.

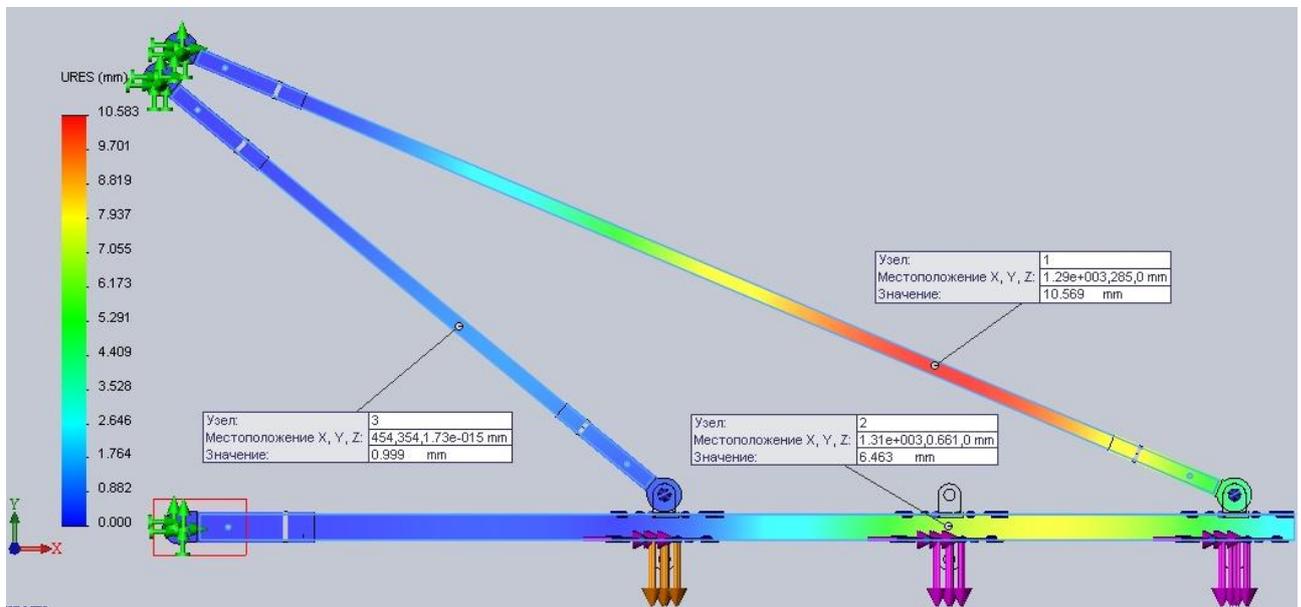


Рисунок 2.31 – Изменение прогиба стержней кронштейна в зависимости от сил тяжести проводов $G = 3,0$ кН

при силе аэродинамического сопротивления $+F_{rw} = 100$ % от G

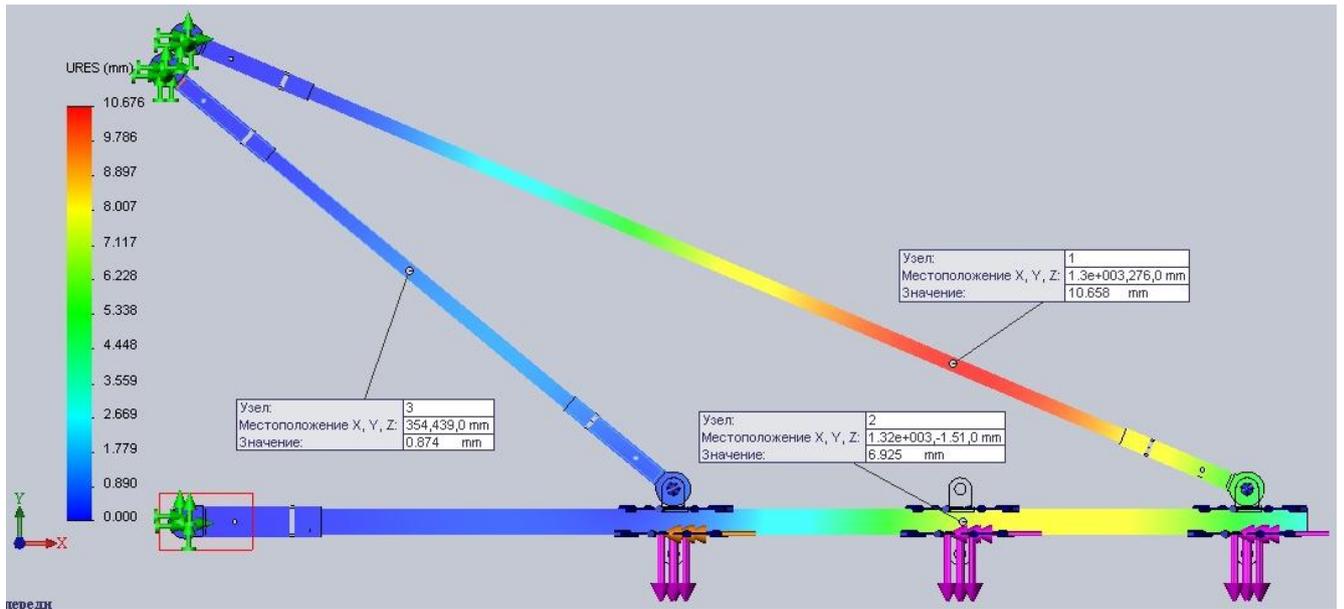


Рисунок 2.32 – Изменение прогиба стержней кронштейна в зависимости от сил тяжести проводов $G = 3,0$ кН при силе аэродинамического сопротивления $-F_{rw} = 100\%$ от G

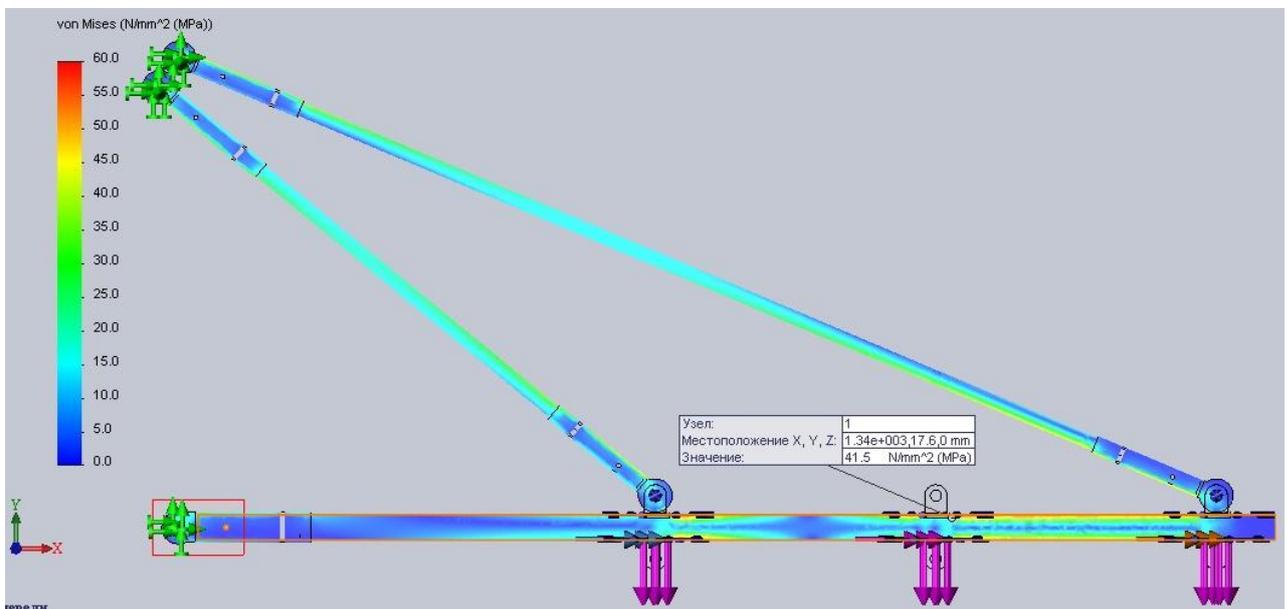


Рисунок 2.33 – Эквивалентное динамическое напряжение в сечении траверсы кронштейна с двумя тягами при силе тяжести от каждого провода $G = 3,0$ кН и силе аэродинамического сопротивления $+F_{rw} = 100\%$ от G

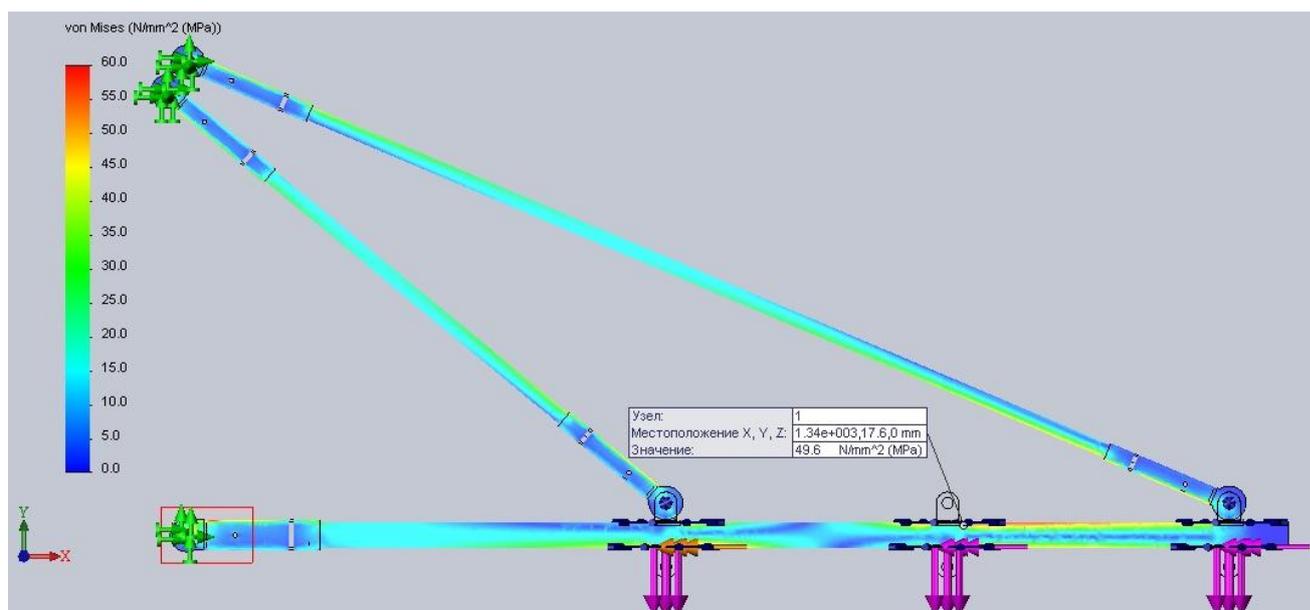


Рисунок 2.34 – Эквивалентное динамическое напряжение в сечении траверсы кронштейна с двумя тягами при $G = 3,0$ кН и силы аэродинамического сопротивления $-F_{rw} = 100\%$ от G

Данные эпюры позволяют оценить прогиб и эквивалентное динамическое напряжение в конструкции и верифицировать расчетные значения по предложенной методике расчета механической прочности полимерного кронштейна. Из рисунков 2.31–2.34 определено, что прогиб траверсы составляет при $+F_{rw}$ $\delta = 6,46$ мм, при $-F_{rw}$ $\delta = 6,92$ мм, эквивалентное динамическое напряжение $\sigma_{\text{эквд}}$ при $+F_{rw}$ равно 41,5 МПа, а при $-F_{rw}$ $\sigma_{\text{эквд}} = 49,6$ МПа. Полученные значения удовлетворяют требованиям по прогибу и не превышают соотношения 1/150, эквивалентное динамическое напряжение находится в требуемых пределах и не превышает условия $\sigma_{\text{эквд}} \leq \sigma_{\text{доп}}$.

Расхождение значений, полученных в программном комплексе *SolidWorks* и в программе «*POLUS v.2.1.1*», составляют: при $+F_{rw}$ – 0,69 %; при $-F_{rw}$ – 6,65 %.

По проведенным исследованиям следует, что предложенная методика определения прочности полимерного кронштейна является достаточно точной и может быть использована при проектировании и разработке рабочей документации для

новых полимерных поддерживающих конструкций проводов воздушной линии электропередачи расположенных на опорах контактной сети.

2.1.3 Исследование прочностных характеристик полимерных кронштейнов в гололедных и ветровых районах

Так как система электроснабжения должна иметь перспективное увеличение мощности, а следовательно, увеличение сечения проводов, в таблицах 2.7–2.10 представлены результирующие нагрузки проводов СИП-3 различного сечения [5].

Таблица 2.7 – Результирующая нагрузка F (Н) на провод СИП-3 1×50

Результирующая нагрузка на провода в режиме гололеда с ветром F (Н), для пролета $L=70$ м			Гололедный район					
			1	2	3	4	5	
			Толщина стенки гололеда b_r , мм					
			5	10	15	20	25	
Ветровой район	1	Скорость ветра V_H , м/с	20	491,6193	918,6512	1512,589	2226,838	3137,815
	2		25	580,9141	1038,141	1665,164	2363,569	3294,124
	3		30	687,0363	1185,853	1858,486	2543,284	3501,969
	4		32	803,3447	1352,572	2081,231	2757,593	3752,796
	5		36	926,0089	1532,105	2324,958	2999,089	4038,606

Таблица 2.8 – Результирующая нагрузка F (Н) на провод СИП-3 1×70

Результирующая нагрузка на провода в режиме гололеда с ветром F (Н), для пролета $L=70$ м			Гололедный район					
			1	2	3	4	5	
			Толщина стенки гололеда b_r , мм					
			5	10	15	20	25	
Ветровой район	1	Скорость ветра V_H , м/с	20	557,7664	1010,203	1629,549	2366,05	3300,932
	2		25	641,8311	1125,482	1779,312	2501,816	3457,567
	3		30	742,6822	1267,913	1967,95	2678,462	3663,406
	4		32	854,3961	1429,402	2185,419	2888,499	3910,689
	5		36	973,2392	1604,203	2423,972	3125,201	4192,086

Таблица 2.9 – Результирующая нагрузка F (Н) на провод СИП-3 1×95

Результирующая нагрузка на провода в режиме гололеда с ветром F (Н), для пролета $L=70$ м			Гололедный район					
			1	2	3	4	5	
			Толщина стенки гололеда b_r , мм					
			5	10	15	20	25	
Ветровой район	1	Скорость ветра V_H , м/с	20	633,1315	1110,773	1755,523	2514,561	3473,477
	2		25	711,8787	1221,639	1902,12	2648,989	3630
	3		30	807,1388	1358,557	2085,812	2822,315	3833,526
	4		32	913,7619	1514,478	2297,721	3027,865	4077,022
	5		36	1028,219	1684,134	2530,767	3259,549	4353,785

Таблица 2.10 – Результирующая нагрузка F (Н) на провод СИП-3 1×120

Результирующая нагрузка на провода в режиме гололеда с ветром F (Н), для пролета $L=70$ м			Гололедный район					
			1	2	3	4	5	
			Толщина стенки гололеда b_r , мм					
			5	10	15	20	25	
Ветровой район	1	Скорость ветра V_H , м/с	20	703,7965	1202,004	1867,64	2645,459	3624,257
	2		25	778,0888	1309,043	2011,324	2778,481	3780,337
	3		30	868,505	1441,204	2190,69	2948,839	3981,686
	4		32	970,5492	1592,242	2397,744	3150,481	4221,83
	5		36	1080,933	1757,297	2625,944	3377,809	4494,557

Оперируя величинами результирующей нагрузки в зависимости от сил тяжести каждого провода G_i и воздействия аэродинамической силы $\pm F_{rwi}$ (см. таблицу 1.2) и расчетными данными (см. рисунки 2.29 и 2.30), следует, что в рассмотренном диапазоне приложенных сил полимерный кронштейн КПСИП-3 отвечает требованиям по прочности и прогибу.

При нагрузке сил тяжести от проводов $G = 3,2$ кН и аэродинамическом сопротивлении $F_{rw} = 100\%$ от G , результирующая нагрузка составляет $F = 4525,48$ Н (что соответствует максимальному значению F по таблице 2.10). При этом эквивалентное динамическое напряжение $\sigma_{эвд}$ составит 49,39 МПа, а максимальный прогиб $\delta = 5,74$ мм.

Таким образом, полимерный кронштейн КПСИП-3 с использованием проводов СИП сечением токопроводящей жилы от 50 мм^2 до 120 мм^2 , включительно, можно рекомендовать к применению в гололедных районах до 5 района включи-

тельно, при одновременном воздействии ветровых нагрузок до 36 м/с включительно, что соответствует 5 ветровому району.

2.2 Разработка методики расчета электрической прочности полимерного кронштейна

2.2.1 Анализ особенностей и направления решений при разработке методики расчета электрической прочности полимерного кронштейна

Линейная изоляция воздушных линий должна обеспечивать бесперебойную и безопасную передачу электрической энергии. Устройства тягового электропитания не допускают перерыва в питании, поэтому необходим квалифицированный подход к выбору изоляционных параметров, одним из которых является степень загрязнения (СЗ) – показатель, учитывающий влияние загрязненности атмосферы на снижение электрической прочности изоляции электроустановок [52].

Наружная изоляция воздушных линий, расположенных на опорах контактной сети, из-за близости и большой мощности источников загрязнения работает в более тяжелых условиях, чем линии электропередачи, расположенные на высоте 20–30 метров [128].

Источники загрязнения атмосферы, оказывающие наибольшее влияние на работу наружной изоляции системы электропитания железнодорожного транспорта, можно классифицировать следующим образом: загрязнение изоляции происходит естественным (солончаки, засоленные водоемы, пылевые бури и т. д.) и искусственным (промышленные предприятия, пожары, подвижной состав) спосо-

бами, оседанием на поверхности изоляции частиц пыли или аэрозолей газовых примесей. Под влиянием химических процессов образуются вещества, которые переходят из газообразного состояния в твердые или жидкие. Пыль и другие загрязнения накапливаются на поверхности элементов ВЛ.

Значительным источником загрязнения изоляции электрифицированных железных дорог являются как сами движущиеся составы, поднимающие большое количество пыли с поверхности земли, так и перевозимые ими грузы [129, 130].

Анализ опыта эксплуатации систем электроснабжения железнодорожного транспорта в районах с загрязненной атмосферой показывает, что повреждение наружной изоляции является одной из основных причин отказов системы электроснабжения железных дорог, а следовательно, перебоев в движении поездов [128].

Электрическая прочность изоляционной конструкции определяется её разрядным напряжением. Основным (базовым) документом, регламентирующим требуемую электрическую прочность (разрядное напряжение) наружной изоляции высоковольтных электроустановок в районах с различной степенью загрязнения (СЗ), является ПУЭ-7 (гл. 1.9) [52].

Согласно этому документу, выбор полимерных изоляторов или конструкций в зависимости от СЗ и номинального напряжения электроустановки должен производиться по разрядным характеристикам в загрязненном и увлажненном состоянии. При этом изоляционная конструкция, находящаяся под фазным напряжением, должна иметь 50 %-ные разрядные напряжения (электрическую прочность) промышленной частоты в загрязненном и увлажненном состоянии не ниже значений, приведенных в таблице 2.11. Удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения изоляции χ должна приниматься (не менее): для 1-й СЗ – 5 мкСм, 2-й СЗ – 10 мкСм, 3-й СЗ – 20 мкСм, 4-й СЗ – 30 мкСм [52].

Связь показателя СЗ с удельной поверхностной проводимостью слоя загрязнения изоляции χ может быть определена в соответствии с таблицей 2.12.

Следует отметить, что χ является одним из основных параметров, характеризующих загрязнение изоляционных конструкций.

Таблица 2.11 – 50 %-ные разрядные напряжения ВЛ 6–10 кВ, внешней изоляции электрооборудования и изоляторов ОРУ 6–10 кВ в загрязненном и увлажненном состоянии

Номинальное напряжение электроустановки, кВ	50 %-ные разрядные напряжения, кВ (действующие значения)
6	8
10	13

Таблица 2.12 – Связь показателя СЗ с удельной поверхностной проводимостью слоя загрязнения изоляции

Степень загрязнения, СЗ	Удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения χ , мкСм
1	$0 \leq \chi < 10$
2	$10 \leq \chi < 20$
3	$20 \leq \chi < 30$
4	$30 \leq \chi$

Согласно [119], удельная поверхностная электрическая проводимость слоя загрязнения (χ), мкСм – это величина, определяемая делением коэффициента формы изолятора (K_ϕ) или участка его поверхности на сопротивление поверхности изолятора (R) или её участка в состоянии насыщения слоя загрязнения влагой:

$$\chi = \frac{K_\phi}{R}, \quad (2.45)$$

Учитывая, что поверхностная электрическая проводимость слоя загрязнения изоляции ($\chi_{и}$) определяется как $\chi_{и} = \frac{1}{R}$, связь между χ и $\chi_{и}$ описывается выраже-

нием

$$\chi = K_\phi \cdot \chi_{и}. \quad (2.46)$$

Для подвесных стеклянных тарельчатых изоляторов ПС-70Е коэффициент формы составляет 0,79 [121], а для гладкого цилиндра $K_\phi = 1$ [53].

Согласно [ПУЭ-7], изолирующие элементы (участки) разрабатываемого в диссертации полимерного кронштейна, находящиеся под фазным напряжением, должны иметь 50 %-ные разрядные напряжения (действующие значения) промышленной частоты для ЛЭП 6 кВ – 8 кВ и для ЛЭП 10 кВ – 13 кВ при соответствующей СЗ удельной поверхностной проводимости слоя загрязнения.

При этом коэффициент запаса электрической прочности (K_3), определяемый как отношение 50 %-ного разрядного напряжения к воздействию на изоляцию фазному напряжению составляет:

ЛЭП 6 кВ

$$K_3 = \frac{U_{50\%}}{U_{\phi}} = \frac{U_{50\%} \cdot \sqrt{3}}{U_{\text{л}}} = \frac{8 \cdot \sqrt{3}}{6} = 2,31. \quad (2.47)$$

ЛЭП 10 кВ

$$K_3 = \frac{U_{50\%}}{U_{\phi}} = \frac{U_{50\%} \cdot \sqrt{3}}{U_{\text{л}}} = \frac{13 \cdot \sqrt{3}}{10} = 2,25, \quad (2.48)$$

где $U_{\text{л}}$ – междуфазное (линейное) напряжение [131].

В приведенных формулах (2.47 и 2.48) принято, что в нормальном режиме в трехпроводной сети с изолированной нейтралью напряжения фаз относительно земли одинаковы и составляют $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}}$, как и в сети с заземленной нейтралью.

Для участков полимерного кронштейна, находящихся под междуфазным напряжением (линейным), необходимая электрическая прочность может быть в первом приближении определена следующим образом:

$$U_{50\%} = K_3 \cdot U_{\text{л}}. \quad (2.49)$$

Тогда:

– для ЛЭП 6 кВ – $U_{50\%} = K_3 \cdot U_{л} = 2,31 \cdot 6 = 13,86$ кВ;

– для ЛЭП 10 кВ – $U_{50\%} = K_3 \cdot U_{л} = 2,25 \cdot 10 = 22,5$ кВ.

Требования по коэффициенту запаса электрической прочности обязательны, так как он обеспечивает необходимый уровень надежности работы изоляции.

Необходимость таких больших коэффициентов запаса определяется большим числом изоляционных конструкций на линиях, работающих под воздействием практически одинакового напряжения, то есть основная часть коэффициента запаса определяется уменьшением электрической прочности изоляции линии в целом по сравнению с электрической прочностью одной изоляционной конструкции. Именно такие большие коэффициенты запаса электрической прочности обеспечивают требуемую надежность работы изоляции в целом.

Таким образом, участки полимерного кронштейна воздушных ЛЭП ПЭ, находящиеся под фазным и междуфазным напряжением, должны иметь 50 %-ные разрядные напряжения промышленной частоты в загрязненном и увлажненном состоянии не ниже значений, приведенных в таблице 2.13.

Таблица 2.13 – Действующие значения разрядных напряжений для фазного и междуфазных участков полимерного кронштейна

Номинальное напряжение ЛЭП, кВ	50 %-ные разрядные напряжения, кВ (действующие значения)	
	Участок траверсы, находящийся под фазным напряжением	Участки траверсы, находящиеся под междуфазным напряжением
6	8	14
10	13	23

На рисунке 2.35 представлена схема кронштейна с указанием участков, находящихся под фазным и междуфазными напряжениями.

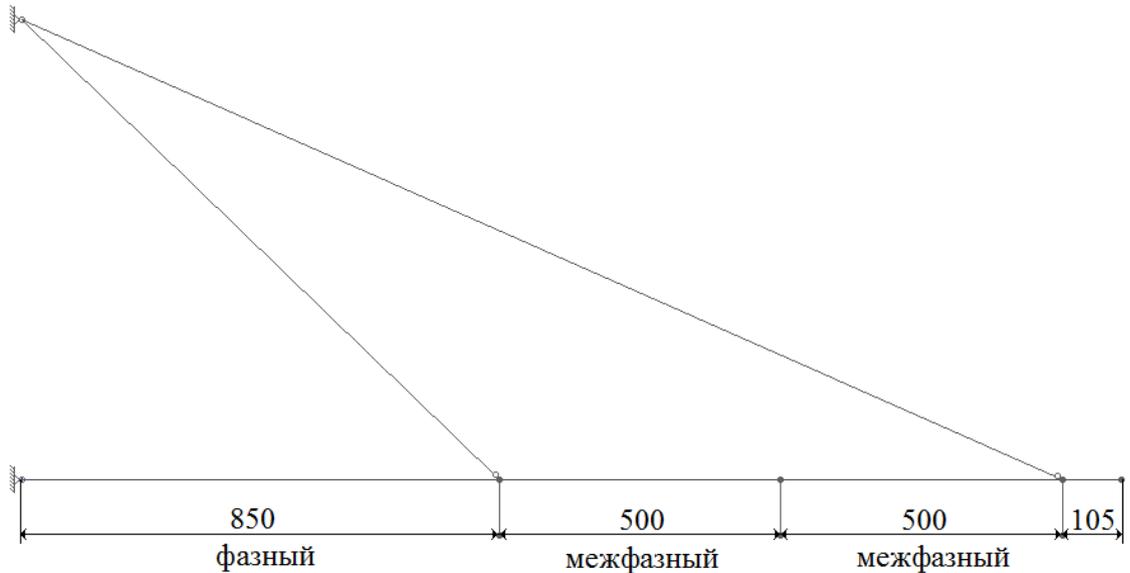


Рисунок 2.35 – Схема полимерного кронштейна КПСИП-3

Еще одним важным параметром работоспособности воздушной линии является грозоупорность, которая, как правило, рассчитывается только для первого импульса разряда молнии, так как вероятность перекрытия изоляции при воздействии последующих импульсов на порядок и более меньше, чем при воздействии первого импульса [122].

Проблема защиты ВЛ напряжением 6–10 кВ от грозовых перенапряжений ВЛ весьма актуальна, так как линии имеют низкую импульсную прочность изоляции, вследствие чего защитные тросы не применяются из-за их малой эффективности [122].

Для расчета грозоупорности ВЛ предпочтительнее использовать распределения токов молнии, с помощью которого определяется вероятность перекрытия линейной изоляции.

На основании вышеизложенного в разрабатываемой методике оценки электрической прочности полимерного кронштейна необходимо:

1. Определить зависимость электрической прочности (разрядное напряжение) полимерного кронштейна от геометрических характеристик и степени загрязнения.

2. Определить численные значения удельной поверхностной проводимости при изменении толщины и концентрации загрязнения изоляции:

– произвести сравнение численных значений удельной поверхностной проводимости при изменении толщины и концентрации загрязнения полимерного кронштейна в сравнении с применяемыми на воздушных ЛЭП стеклянными и фарфоровыми изоляторами;

– дать вероятностную оценку результатов разработанной методики электрической прочности полимерного кронштейна в определении его работоспособности при различных зонах загрязнения.

3. Оценить степень сходимости результатов моделирования и результатов высоковольтных испытаний.

4. Дать вероятностную оценку перекрытия линейной изоляции полимерного кронштейна, стеклянных и фарфоровых изоляторов воздушных ЛЭП при грозовых перенапряжениях.

2.2.2 Определение зависимости электрической прочности полимерного кронштейна от геометрических характеристик и степени загрязнения

Для оценки электрической прочности предлагаемой гладкостержневой изоляционной конструкции рассмотрена математическая модель Г. Н. Александрова [132] перекрытия загрязненного и увлажненного гладкостержневого изолятора.

В математической модели приняты следующие допущения:

1) в любой момент времени на поверхности изолятора возникает только одна частичная дуга;

2) длина частичной дуги l_d равна длине пути тока утечки, перекрытого ею;

3) сопротивление не перекрытого частичной дугой участка поверхности

гладкостержневого изолятора вычисляется по формуле

$$R_{\text{н}} = \frac{L - l_{\text{д}}}{\pi \cdot \chi \cdot D}. \quad (2.50)$$

где L – длина пути утечки тока по поверхности гладкостержневого изолятора; D – диаметр гладкостержневого изолятора.

Без учета увеличения χ за счет роста температуры слоя и уменьшения χ за счет подсыхания слоя, то есть в предположении, что эти противоположные тенденции изменения χ взаимно компенсируются, а также без учета точечного растекания тока с опорной точки частичной дуги, условие продвижения частичной дуги получено из сопоставления проводимостей частичной дуги и неперекрытого частичной дугой участка поверхности изолятора.

Погонное сопротивление частичной дуги, то есть сопротивление единицы длины дуги, обратно пропорционально току через частичную дугу примерно в полуторной степени ($n = 0,55-0,7$).

$$r_{\text{д}} = \frac{E_{\text{д}}}{l_{\text{д}}} = \frac{A}{I^{1+n}}. \quad (2.51)$$

где – A и n параметры ВАХ частичной дуги.

Погонное сопротивление увлажненного слоя загрязнения гладкостержневого изолятора:

$$r_{\text{н}} = \frac{R_{\text{н}}}{L - l_{\text{д}}} = \frac{1}{\pi \cdot \chi \cdot D}. \quad (2.52)$$

Полное сопротивление поверхности гладкостержневого изолятора с учетом шунтирования подсушенного участка поверхности частичной дугой:

$$R_{\Sigma} = r_{\text{д}} l_{\text{д}} + r_{\text{н}} (L - l_{\text{д}}) = R_{\text{н}} + l_{\text{д}} (r_{\text{д}} - r_{\text{н}}), \quad (2.53)$$

где $R_{\text{н}}$ – сопротивление полностью увлажненного слоя загрязнения.

В зависимости от соотношения $r_{\text{д}}$ и $r_{\text{н}}$ сопротивление поверхности изолятора R_{Σ} при возникновении частичной дуги может быть больше сопротивления ненарушенного подсушкой слоя загрязнения ($r_{\text{д}} > r_{\text{н}}$), остаться неизменным ($r_{\text{д}} = r_{\text{н}}$) либо уменьшиться ($r_{\text{д}} < r_{\text{н}}$).

В первом случае ($r_{\text{д}} > r_{\text{н}}$) ток по поверхности изолятора меньше тока по полностью увлажненному слою.

$$I = \frac{U}{R_{\text{н}} + l_{\text{д}} (r_{\text{д}} - r_{\text{н}})}. \quad (2.54)$$

Следовательно, энергия, выделяющаяся на поверхности изолятора, уменьшается, а поверхность изолятора начинает насыщаться влагой. При случайном удлинении частичной дуги сопротивление R_{Σ} увеличивается еще больше (2.53), что еще больше уменьшает ток. Увлажнение подсушенного слоя приводит к шунтированию частичной дуги и ее погасанию. Это условие ($r_{\text{д}} > r_{\text{н}}$) соответствует режиму перемешивающихся дужек.

Напротив, если ($r_{\text{д}} < r_{\text{н}}$), то $R_{\Sigma} < R_{\text{н}}$, и ток после образования частичной дуги увеличивается. Увеличение частичной дуги приводит к дальнейшему уменьшению сопротивления $r_{\text{д}}$ и увеличению тока. Это, в свою очередь, приводит к дальнейшему уменьшению сопротивления $r_{\text{д}}$ и дальнейшему росту тока. В результате опорная точка дуги проскальзывает по поверхности изолятора вплоть до полного перекрытия. Таким образом, критический ток, после которого наступает перекрытие изолятора, определяется равенством $r_{\text{д}} = r_{\text{н}}$. После подстановки в это равенство значений $r_{\text{д}}$ и $r_{\text{н}}$ из формул (2.51) и (2.52) получим:

$$I_{\text{кр}} = (A \cdot \chi \cdot \pi \cdot D)^{\frac{1}{1+n}}. \quad (2.55)$$

Используя (2.55) и учитывая, что для гладкого цилиндрического изолятора с равномерным слоем загрязнения сопротивление увлажненной поверхности выражается $R = L/(\pi \cdot \chi \cdot D)$, получим влагоразрядное напряжение для гладкостержневого изолятора:

$$U_{\text{вр}} = I_{\text{кр}} \cdot R = \frac{L \cdot A^{\frac{1}{1+n}}}{(\chi \cdot \pi \cdot D)^{\frac{n}{1+n}}}. \quad (2.56)$$

Математическая модель Г. Н. Александрова проста и не обременена различными уточнениями, но, как известно, зачастую более простая модель позволяет лучше и глубже исследовать реальный процесс. Модель позволяет исследовать электрическую прочность гладкостержневого изолятора в зависимости от его геометрических параметров (длины и диаметра), степени загрязнения и характеристик дуги при перекрытии изолятора.

Определение области применения изоляционных конструкций в районах, различных по степени их загрязнения, предлагается производить по следующей методике (рисунок 2.36).

1. Определяется зависимость электрической прочности (разрядного напряжения $U_{\text{вр}}$) рассматриваемой изоляционной конструкции от степени её загрязнения (удельной поверхностной проводимости χ). Эта зависимость может быть определена с использованием наиболее подходящей, для рассматриваемой изоляционной конструкции, математической модели зависимости $U_{\text{вр}} = f(\chi)$.

2. В тех же координатах на графике $U_{\text{вр}} = f(\chi)$ строится прямая, соответствующая нормируемому в [52] 50 %-ному разрядному напряжению (таблица 2.13).

3. Слева от точки пересечения этих линий располагается область, где электрическая прочность рассматриваемой изоляционной конструкции не меньше нормируемой в [52] то есть искомая область применения.

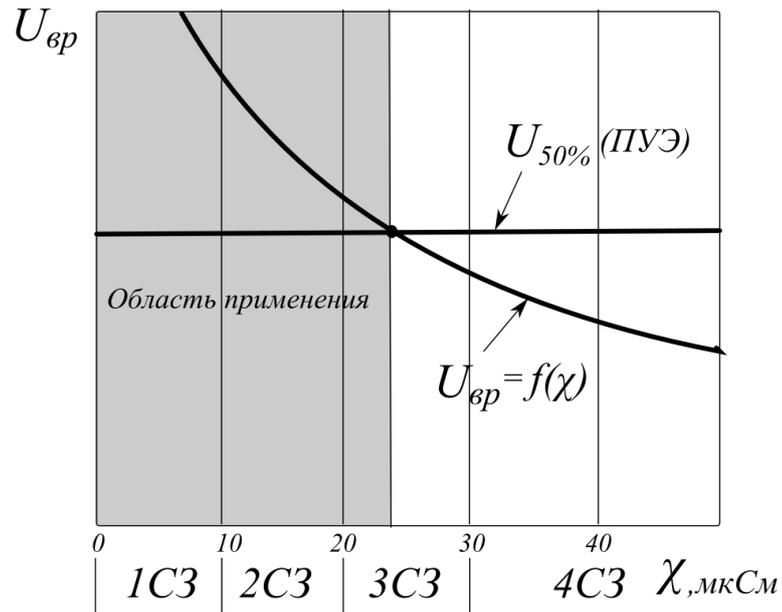


Рисунок 2.36 – Определение области применения

По приведенной методике, используя программный комплекс *Mathcad*, выполнена оценка области применения полимерного кронштейна с диаметром траверсы 4,6 см, длине межфазного расстояния $L_{мф} = 40; 50; 60$ см при напряжении $U_{л} = 6$ и 10 кВ (рисунок 2.37). Длины $L_{мф}$ выбраны в соответствии с СП 226.1326000.2014 «Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции» [133].

Используя научные исследования В. М. Рущкого, зависимость $U_{вр} = f(\chi)$ определяется по формуле (2.56) при значениях коэффициентов $A = 140$ и $n = 0,56$ для быстро удлиняющейся дуги, так как именно это характерно для процесса перекрытия загрязненных и увлажненных изоляторов [53].

Следует иметь в виду, что в модели Г. Н. Александра не учитываются высокие гидрофобные качества защитной оболочки гладкостержневой полимерной траверсы, кроме того, по формуле (2.56) рассчитывается нижняя граница 50 %-ного разрядного напряжения, что позволяет рассчитывать на более высокие разрядные характеристики.

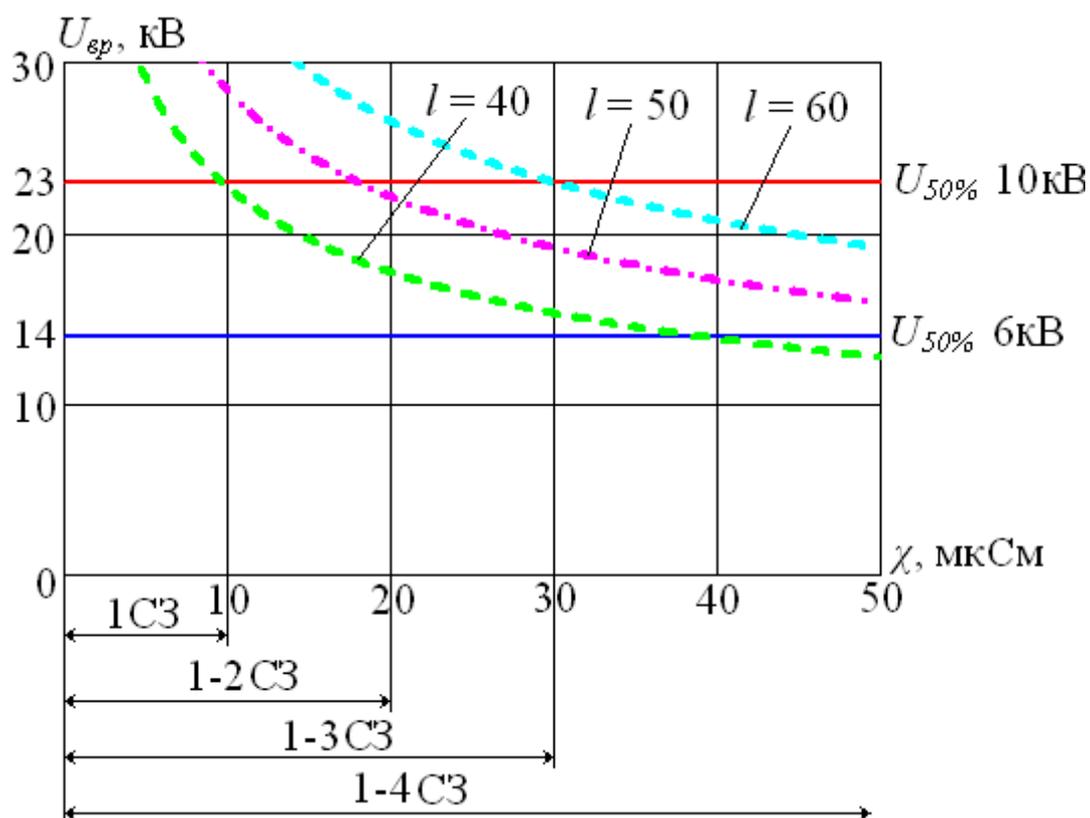


Рисунок 2.36 – Определение области применения полимерного кронштейна для ЛЭП ПЭ 10 кВ

Как видно из полученных результатов, область применения полимерного кронштейна КПСИП-3 с гладкостержневой траверсой диаметром 46 мм с длиной междуфазного промежутка 0,5 м находится в пределах 1–2 зонах степени загрязнения.

Безусловно, полученные результаты с использованием достаточно простой математической модели требуют экспериментального подтверждения. Однако полученный результат показывает принципиальную возможность применения гладкостержневых полимерных траверс диаметром 4,6 см с горизонтальным расположением фазных защищенных и неизолированных проводов. При этом следует иметь в виду, что технология изготовления гладкостержневых полимерных конструкций проще, чем оребренных, и на их изготовление требуется меньше дорогостоящей кремнийорганической резины.

2.2.3 Определение численных значений удельной поверхностной проводимости при изменении толщины и концентрации загрязнения изоляции

Разрабатываемая методика оценки численных значений удельной поверхностной проводимости полимерного кронштейна может быть реализована путем создания модели в программе моделирования мультифизических процессов *Comsol Multiphysics* [134]. Данная программа предназначена для расчета физических полей, которые можно описать одним или системой дифференциальных уравнений в частных производных. Программа основана на методе конечных элементов. *Comsol Multiphysics* имеет стандартный для этого класса программ подход к построению и расчету математической модели [135]:

1. Выбор режима моделирования, т. е. нужного физического процесса с соответствующим ему дифференциальным уравнением.
2. Построение геометрии изоляционной конструкции.
3. Задание свойств и параметров расчетной области (построенной геометрии), а также необходимых функций, констант и различных зависимостей.
4. Выбор или задание граничных условий.
5. Построение расчетной сетки.
6. Расчет, обработка и визуализация полученных результатов.

Для решения поставленных задач при определении численных значений удельной поверхностной проводимости необходимо понять основные физические процессы, происходящие в слое загрязнения при увлажнении изоляции.

Протекание тока утечки по увлажненному слою загрязнения сопровождается выделением в нем тепла и увеличением электропроводности из-за повышения температуры раствора электролита. С другой стороны, при этом происходит испарение воды из слоя загрязнения, что при определенных условиях (количество испаряемой воды больше количества воды, поступающей на поверх-

ность изолятора за то же самое время) уменьшает объемную долю раствора электролита в увлажненном слое загрязнения и соответственно электропроводность [53].

На протекание указанных процессов существенным образом влияет форма поверхности изоляционной конструкции. Так, для изоляторов, применяемых на ВЛ СЦБ и ПЭ, изоляционная часть имеет переменный вдоль длины пути утечки диаметр. В процессе эксплуатации поверхность изоляторов загрязняется неравномерно как вдоль пути утечки, так и в радиальном направлении. Если для простоты допустить радиальную равномерность удельной поверхностной проводимости (χ), то проводимость изолятора определяется по формуле [53]:

$$\chi_u = \frac{1}{\frac{1}{\pi} \int_0^L \frac{dL}{\chi(L)D(L)}}, \quad (2.57)$$

где $D(L)$ – переменный по координате L диаметр изолятора.

При равномерности распределения удельной поверхностной проводимости вдоль длины пути утечки выражение (2.57) примет вид:

$$\chi_u = \frac{1}{\frac{1}{\pi} \int_0^L \frac{dL}{\chi D(L)}} = \frac{\chi}{K_\phi}, \quad (2.58)$$

где $\frac{1}{\pi} \int_0^L \frac{dL}{D(L)} = K_\phi$ – коэффициент формы изолятора [116].

Увлажненный слой загрязнения на поверхности изолятора можно рассматривать как изотропную проводящую среду. Если изолятор находится под напряжением промышленной частоты или выпрямленным, то по поверхности изолятора протекает соответственно квазистационарный, или постоянный, ток утечки, для которого в каждой точке поверхности справедлив закон Ома в дифференциальной форме [136], из которого следует:

$$\bar{E} = \bar{j} \cdot \chi_v^{-1}(L), \quad (2.59)$$

где \bar{E} – вектор напряженности электрического поля, направленный по касательной к поверхности изолятора (тангенциальная составляющая вектора напряженности электрического поля), В/см;

\bar{j} – вектор плотности тока, А/см;

$\chi_v(L)$ – удельная объемная проводимость увлажненного слоя загрязнения, мкСм/см.

На границе раздела двух сред (увлажненного слоя загрязнения и окружающего воздуха) тангенциальные составляющие вектора напряженности электрического поля равны. Таким образом, электрическое поле в воздухе вблизи поверхности увлажненного слоя загрязнения соответствует статическому, или квазистатическому, полю тока утечки соответственно постоянного или переменного промышленной частоты.

Для модуля плотности тока может быть записано выражение [53]:

$$j(L) = \frac{I_y}{\pi D(L) h(L)}, \quad (2.60)$$

где I_y – ток утечки, А;

h – толщина увлажненного слоя загрязнения, мм.

Подставив (2.58) в (2.59), получим выражение:

$$E(L) = \frac{I_y}{\pi \cdot D(L) \cdot h(L) \cdot \chi_v(L)}. \quad (2.61)$$

Из анализа опыта эксплуатации и экспериментальных данных отечественных и зарубежных авторов отмечено, что даже при умеренном загрязнении происходит перераспределение напряженности электрического поля таким обра-

зом, что вблизи стержня изолятора создаются условия для электрического разряда в воздухе.

Перераспределение напряженности электрического поля происходит вследствие интенсивного подсыхания увлажненного слоя загрязнения в области наибольшей плотности тока (у тарельчатых изоляторов вблизи стержня). Первоначально подсыхает небольшое пятно, где плотность тока наибольшая. Ток обтекает подсушенное место, при этом плотность тока в направлении, перпендикулярном пути тока утечки, увеличивается. В этом направлении происходит образование подсушенной кольцевой зоны. Резко возрастает неравномерность распределения напряженности в области подсушенной кольцевой зоны, и создаются условия для электрического пробоя воздушного промежутка над ней – происходит так называемый частичный разряд [53].

В случае гладкого цилиндрического изолятора с постоянным вдоль длины пути утечки диаметром, из-за неизбежных локальных неравномерностей увлажненного слоя загрязнения, формируется подсушенная зона.

При заданном напряжении ток частичного разряда определяется суммой сопротивлений частичного разряда и последовательно расположенной с ним непокрытой части изолятора. Когда ток частичного разряда невелик (несколько мА), а это наблюдается при достаточно высоком сопротивлении непокрытой части изолятора, разряды имеют возрастающую вольт-амперную характеристику (ВАХ) и по принятой терминологии могут быть отнесены к категории тлеющих разрядов. При увеличении кольцевой подсушенной зоны до нескольких сантиметров ток утечки резко уменьшается, и разряды гаснут. Если в результате продолжающегося увлажнения создаются необходимые условия для формирования подсушенной зоны, то процесс повторяется.

При более сильном загрязнении изолятора частичный разряд, шунтирующий подсушенную кольцевую зону, приобретает дуговой характер, а вольт-амперная характеристика разряда становится падающей. Сопротивление такого частичного разряда, или, как принято называть, частичной дуги, сравнительно невелико и ее появление резко снижает общее сопротивление изолятора, вели-

чина которого теперь определяется в основном сопротивлением непокрытой части изолятора и сопротивлением растекания тока с опорной точки дуги.

Далее, в зависимости от определенных условий, процесс разряда может развиваться в двух направлениях.

Частичная дуга удлиняется, а ее опорная точка, проскальзывая по увлажненной поверхности изолятора со скоростью порядка 50 м/с, замыкает электроды, завершая дуговое перекрытие изолятора. Если частичная дуга не перекрывает весь изолятор, а фиксируется, достигая определенной длины, то при продолжающемся увлажнении кольцевая подсушенная зона вновь увлажняется, дуга гаснет, после чего процесс многократно повторяется – наблюдается так называемый режим перемеживающихся дужек. В таком режиме (при коротких частичных дугах с током до нескольких десятков мА) изолятор может находиться в течение всего процесса увлажнения. Из изложенного выше очевидна доминирующая роль энергетических процессов в перекрытии загрязненных и увлажненных изоляторов [53].

Учитывая, что $\chi_u = \frac{1}{R}$ или $\chi_u = \frac{I}{U}$ [117] (где U – значение приложенного к изолятору напряжения; I – значение тока утечки на испытуемом образце), а связь между χ и χ_u описывается выражением (2.46), следует, что при неизменном приложенном напряжении и при соответствующих значениях h и χ_v можно определить ток утечки.

Для решения поставленной задачи при определении численных значений удельной поверхностной проводимости, используя линейное напряжение $U_n = 10\text{кВ}$, удельную объемную проводимость увлажненного слоя загрязнения χ_v в пределах от 500 до 2500 мкСм/см в соответствии с [77] и толщину слоя загрязнения в диапазоне от 0,0001 до 1 мм, с помощью программного продукта *Comsol Multiphysics* производятся расчеты χ для трех типов изоляции ВЛ 6–10 кВ [137]:

1. Подвесной стеклянный изолятор ПС-70Е (рисунок 2.37);
2. Штыревой фарфоровый изолятор ШФ-20Г (рисунок 2.39);
3. Полимерный кронштейн КПСИП-3 (рисунок 2.41).

В модели принято, что соответствующая грань изолятора (шапка – ПС-70Е, штырь – ШФ-20Г) заземлена, а другая (пестик – ПС-70Е, канавка изолятора – ШФ-20Г) находится под переменным потенциалом.

$$U_0(t) = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t). \quad (2.62)$$

Так как полимерный кронштейн служит для фиксации трех проводов трехфазной системы электроснабжения, то потенциалы задаются со смещением относительно фаз и определяются по формулам:

$$U_A(t) = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t), \quad (2.63)$$

$$U_B(t) = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.64)$$

$$U_C(t) = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi). \quad (2.65)$$

При определении поверхностного тока утечки в модуле *Current Conservation* решается оболочная конечно-элементная модель, описываемая следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = 0 \\ J = (\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d}{dt}) \cdot E, \\ E = -\nabla U \end{cases} \quad (2.66)$$

где E – напряженность электрического поля, В/м;

ε_0 – электрическая постоянная, $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м;

ε_r – относительная диэлектрическая проницаемость;

J – плотность тока, А/м²;

σ – проводимость, 1/Ом·м;

U – потенциал, В;

∇ – оператор градиента.

В расчетах вводятся допущения: слой загрязнения равномерно распределяется по всей изоляционной поверхности образцов как по толщине h (мм), так и удельной объемной проводимости χ_v (мкСм/см), все конструкции имеют равномерное поверхностное сопротивление R , рабочее напряжение неизменно и равняется $U_{\text{ф}}$. При увеличении h и χ_v поверхностное сопротивление уменьшается, соответственно увеличивается поверхностный ток – ток утечки.

На рисунках 2.38, 2.40, 2.42 показан процесс моделирования, в котором момент времени t принимается равным 0,04 с.

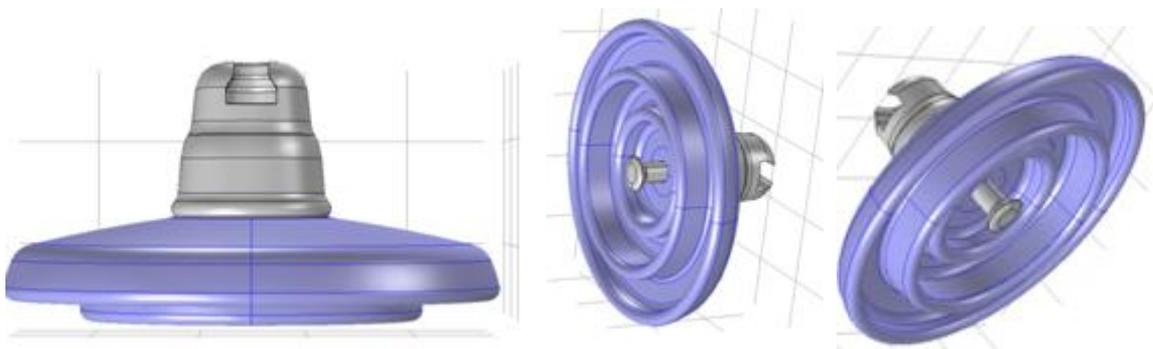


Рисунок 2.37 – Модель изолятора ПС-70Е (внешний вид)

Распределение потенциала по поверхности изолятора ПС-70Е (рисунок 2.38) с направлением протекания тока (стрелками), при $\chi_v = 2500$ мкСм/см и $h = 1$ мм.

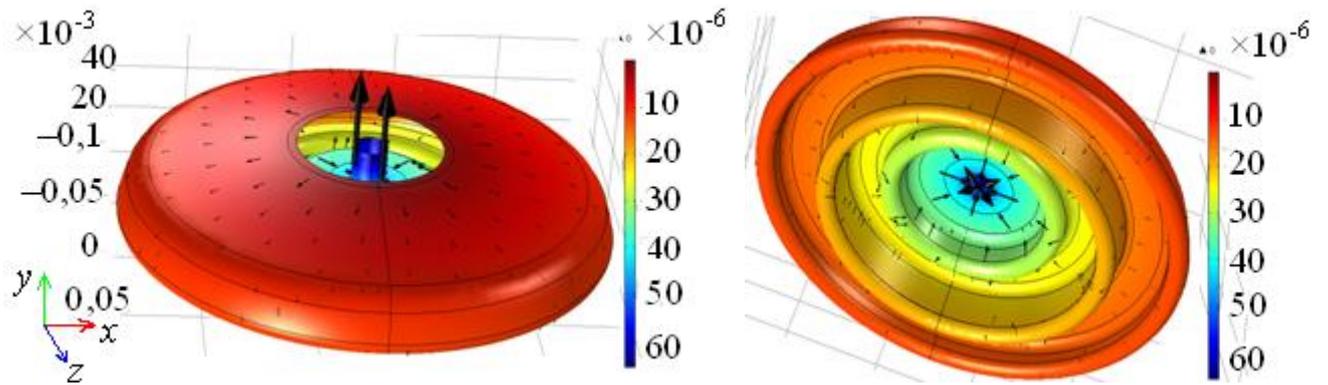


Рисунок 2.38 – Распределение потенциала по поверхности изолятора ПС-70Е
в момент времени $t = 0,01$ с

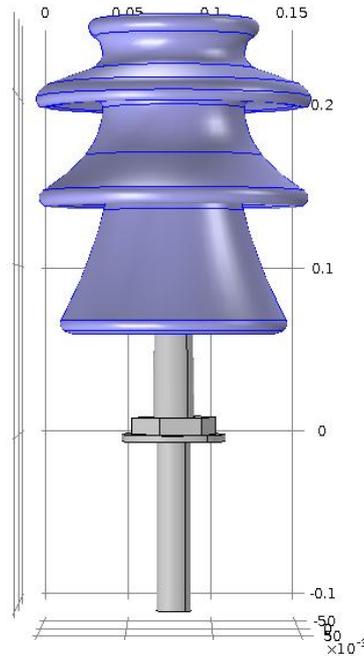


Рисунок 2.39 – Внешний вид изолятора ШФ-20Г

Распределение потенциала по поверхности изолятора ШФ-20Г (рисунок 2.40),
с направлением протекания тока, при $\chi_v = 2500$ мкСм/см и $h = 1$ мм.

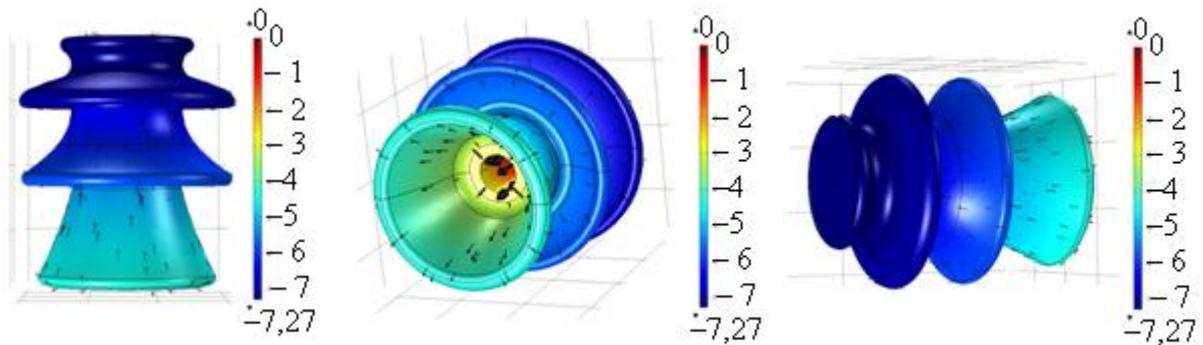


Рисунок 2.40 – Распределение потенциала по поверхности изолятора ШФ-20Г

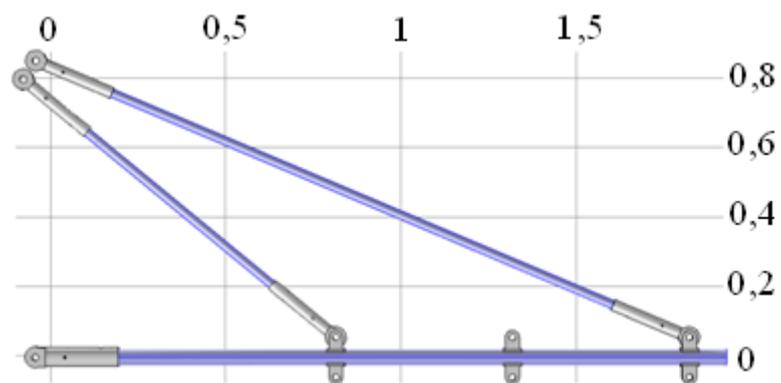


Рисунок 2.41 – Внешний вид полимерного кронштейна с двумя тягами

Распределение потенциала по поверхности полимерного кронштейна с двумя тягами (рисунок 2.42), с направлением протекания тока, при $\chi_v = 2500$ мкСм/см и $h = 1$ мм.

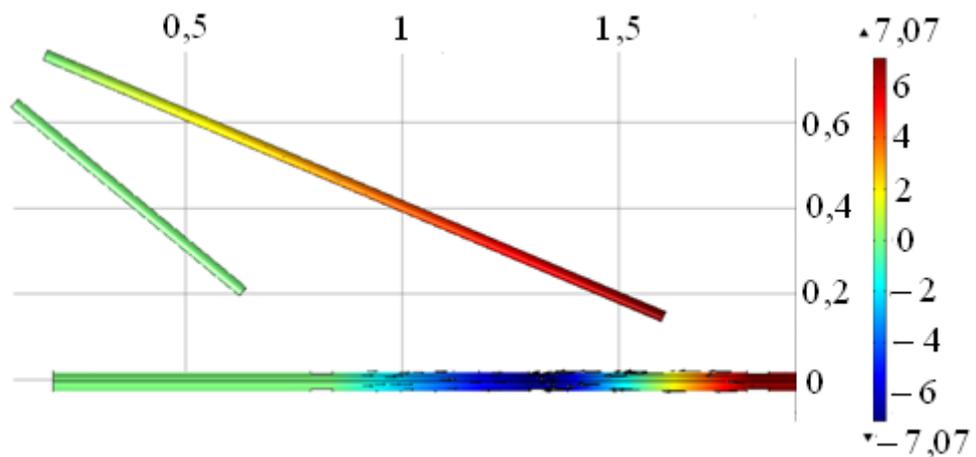


Рисунок 2.42 – Распределение потенциала по поверхности с двумя тягами

В разделе *Results* определяются величины поверхностных токов путем интегрирования плотности тока по соответствующей границе. Полученные на изоляторах токи носят синусоидальный характер.

У кронштейна с двумя тягами межфазные токи, вызванные проводимостью слоя загрязнения, протекают по участку траверсы между узлами крепления проводов и имеют несинусоидальный характер. На рисунке 2.43 показаны кривые токов, протекающие по загрязнённой поверхности траверсы кронштейна.

По тягам кронштейна протекают чрезмерно малые токи, поэтому проводимостью слоя загрязнения на тягах можно пренебречь.

В самом общем случае любая кривая тока во времени может быть охарактеризована эффективным значением тока. Для определения эффективного тока ординаты рассматриваемой кривой тока возводятся в квадрат. Квадрат эффективного тока I_3^2 находится делением площади, ограниченной полученной кривой, на ее основание. На основании полученных данных определяется эффективный ток для каждого типа изоляции, у кронштейна КПСИП-3 максимальный эффективный ток протекает по фазе *B*. По полученным величинам тока и известном напряжении, используя закон Ома, определена удельная поверхностная проводимость изоляционных конструкций для разных зон загрязнения.

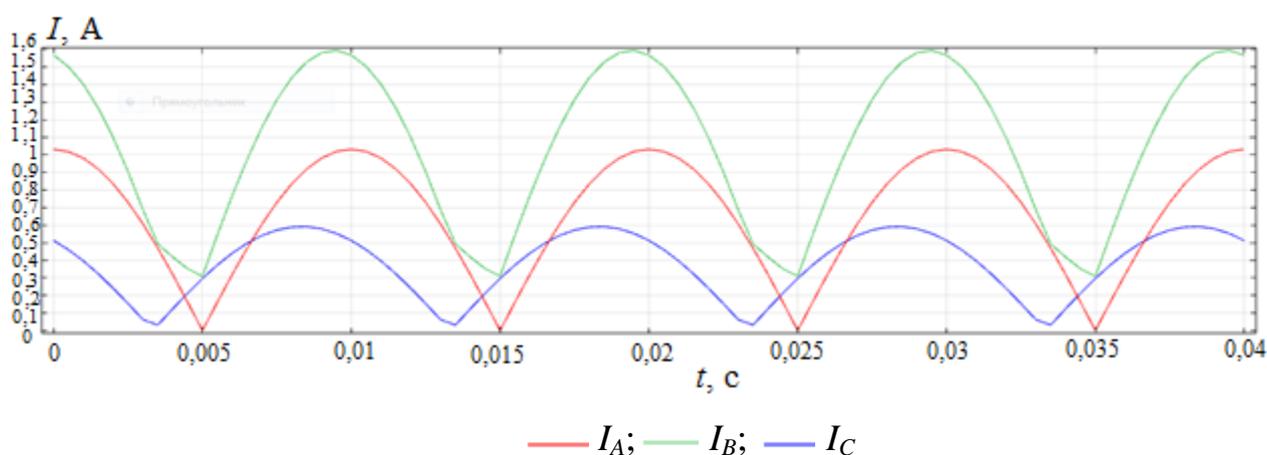


Рисунок 2.43 – Кривые модуля тока во времени полимерного кронштейна с двумя тягами

Оценка численных значений поверхностной проводимости при изменении толщины и концентрации загрязнения полимерного кронштейна в сравнении с применяемыми на воздушных ЛЭП стеклянными и фарфоровыми изоляторами производится с помощью *Microsoft Office Excel*.

Для каждого типа изоляции удельная поверхностная проводимость χ (мкСм) представлена в таблицах 2.14 – 2.16, в которых цветом выделены зоны степени загрязнения (1 – синяя; 2 – зеленая; 3 – желтая; 4 – красная), в соответствии с таблицей 2.12. Также следует отметить, что коэффициент формы изоляторов учтен при моделировании, так как модели изоляционных конструкций имеют точные геометрические характеристики [54, 55].

По результатам расчета оценки численных значений удельной поверхностной проводимости производится вероятностная оценка $P(\chi)$ работоспособности изоляционных конструкций в различных зонах загрязнения.

Таблица 2.14 – Удельная поверхностная проводимость χ изолятора ПС-70Е

h , мм	χ , мкСм/см					
	1	500	1000	1500	2000	2500
0,0001	0,0004	0,002	0,004	0,007	0,009	0,011
0,01	0,0004	0,218	0,435	0,653	0,870	1,088
0,02	0,0009	0,435	0,870	1,305	1,740	2,176
0,03	0,0013	0,653	1,305	1,958	2,611	3,263
0,04	0,0017	0,870	1,740	2,611	3,481	4,351
0,05	0,0022	1,088	2,176	3,263	4,351	5,439
0,06	0,0026	1,305	2,611	3,916	5,221	6,527
0,07	0,0030	1,523	3,046	4,569	6,092	7,615
0,08	0,0035	1,740	3,481	5,221	6,962	8,702
0,09	0,0039	1,958	3,916	5,874	7,832	9,790
0,1	0,0044	2,176	4,351	6,527	8,702	10,878
0,2	0,0087	4,351	8,702	13,053	17,405	21,756
0,3	0,0131	6,527	13,053	19,580	26,107	32,634
0,4	0,0174	8,702	17,405	26,107	34,809	43,512
0,5	0,0218	10,878	21,756	32,634	43,512	54,389
0,6	0,0261	13,053	26,107	39,160	52,214	65,267
0,7	0,0325	15,229	30,458	45,687	60,916	76,145
0,8	0,0348	17,405	34,809	52,214	69,618	87,023
0,9	0,0392	19,580	39,160	58,741	78,321	97,901
1,0	0,0435	21,756	43,512	65,267	87,023	94,205

Таблица 2.15 – Удельная поверхностная проводимость χ_v изолятора ШФ-20Г

h , мм	χ_v , мкСм/см					
	1	500	1000	1500	2000	2500
0,0001	0,00000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003
0,01	0,00012	0,061	0,122	0,183	0,244	0,305
0,02	0,00024	0,122	0,244	0,366	0,489	0,611
0,03	0,00037	0,183	0,366	0,550	0,733	0,916
0,04	0,00049	0,244	0,489	0,733	0,977	1,222
0,05	0,00061	0,305	0,611	0,916	1,222	1,527
0,06	0,00073	0,366	0,733	1,100	1,466	1,833
0,07	0,00086	0,428	0,855	1,283	1,710	2,138
0,08	0,0010	0,489	0,977	1,466	1,955	2,444
0,09	0,0011	0,550	1,100	1,649	2,199	2,749
0,1	0,0012	0,611	1,222	1,833	2,444	3,054
0,2	0,0024	1,222	2,444	3,665	4,887	6,109
0,3	0,0037	1,833	3,665	5,498	7,331	9,163
0,4	0,0049	2,444	4,887	7,331	9,774	12,218
0,5	0,0061	3,054	6,109	9,163	12,218	15,272
0,6	0,0073	3,665	7,331	10,996	14,661	18,326
0,7	0,0086	4,276	8,552	12,828	17,105	21,381
0,8	0,0098	4,887	9,774	14,661	19,548	24,435
0,9	0,0110	5,498	10,996	16,494	21,992	27,490
1,0	0,0122	6,109	12,218	18,326	24,435	30,544

Таблица 2.16 – Удельная поверхностная проводимость χ_v крошштейна КПСИП-3

h , мм	χ_v , мкСм/см					
	1	500	1000	1500	2000	2500
0,0001	$46 \cdot 10^{-6}$	0,0023	0,0046	0,0069	0,0092	0,1150
0,01	0,00046	0,23	0,46	0,69	0,92	1,15
0,02	0,00092	0,46	0,92	1,38	1,84	2,30
0,03	0,00138	0,69	1,38	2,07	2,76	3,45
0,04	0,00184	0,92	1,84	2,76	3,68	4,60
0,05	0,0023	1,15	2,30	3,45	4,60	5,75
0,06	0,00276	1,38	2,76	4,14	5,52	6,90
0,07	0,00322	1,61	3,22	4,83	6,44	8,05
0,08	0,00368	1,84	3,68	5,52	7,36	9,20
0,09	0,00414	2,07	4,14	6,21	8,28	10,35
0,1	0,0046	2,30	4,60	6,90	9,20	11,50
0,2	0,0092	4,60	9,20	13,80	18,40	23,00
0,3	0,0138	6,90	13,80	20,70	27,60	34,50
0,4	0,0184	9,20	18,40	27,60	36,81	46,01
0,5	0,023	11,50	23,00	34,51	46,01	57,51
0,6	0,0276	13,80	27,60	41,41	55,21	69,01
0,7	0,0322	16,10	32,20	48,31	64,41	80,51
0,8	0,0368	18,40	36,81	55,21	73,61	92,01
0,9	0,0414	20,70	41,41	62,11	82,81	103,52
1,0	0,046	23,00	46,01	69,01	92,01	115,00

В общем виде вероятность $P(\chi)$ можно записать как интегральную функцию распределения $F(h)$:

$$F(h) = \int_{h_{\min}}^{h_r} q(h)dh, \quad (2.67)$$

где h_{\min} и h_r – соответственно минимальная и ограничивающая толщина слоя загрязнения определенной зоны, мм (определяется по табл. 2.14–2.16)

Функция $q(h)$ описывается распределением Вейбулла [39]:

$$q(h) = \frac{\beta}{\eta} \cdot \left(\frac{h-h_0}{\eta} \right)^{\beta-1} \cdot \exp \left[- \left(\frac{h-h_0}{\eta} \right)^{\beta} \right], \quad (2.68)$$

где β и η – соответственно параметры формы и масштаба распределения, в расчетах $\beta = 1,6$ и $\eta = 0,25$;

h_0 – минимальная толщина слоя загрязнения, $h_0 = 0,0001$ мм

Функция распределения имеет вид (рисунок 2.44).

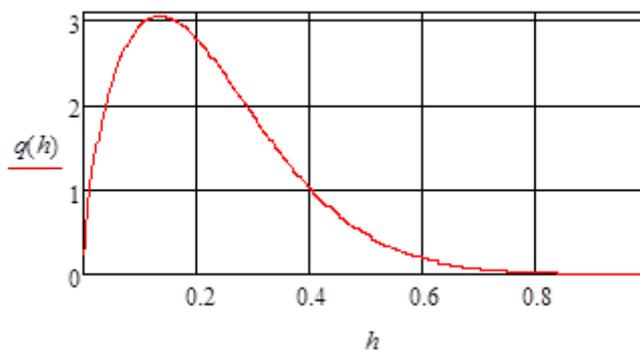


Рисунок 2.44 – Функция распределения

Используя программный продукт *Mathcad*, определяется вероятность $P(\chi)$ для каждой изоляционной конструкции, полученные данные сводятся в таблицу 2.17.

Таблица 2.17 – Вероятность соответствия расчетной χ с нормативным данным

Зоны загрязнения	χ_v , мкСм/см				
	500	1000	1500	2000	2500
ПС-70Е					
1	0,952	0,632	0,357	0,357	0,191
2	0,048	0,291	0,463	0,275	0,165
3	0,0001087	0,067	0,103	0,188	0,275
4	0	0,009834	0,077	0,18	0,368
ШФ-20Г					
1	500	1000	1500	2000	2500
2	1	0,999	0,971	0,923	0,82
3	0	0,0007361	0,029	0,076	0,17
4	0	0	0	0,0007361	0,009725
КПСИП-3					
1	0,923	0,632	0,357	0,357	0,163
2	0,076	0,291	0,275	0,275	0,194
3	0,0007361	0,067	0,291	0,188	0,275
4	0	0,009834	0,077	0,18	0,368

Приняв допущение, что появление удельной поверхностной проводимости с разной концентрацией загрязнения равновероятно, общая вероятностная оценка $P(\chi)$ работоспособности изоляционных конструкций для каждой зоны загрязнения определяется как среднее значение. Для каждого типа изоляции, полученные результаты $P(\chi)$ представлены на рисунке 2.45, в котором цветом выделены зоны степени загрязнения (1 – синяя; 2 – зеленая; 3 – желтая; 4 – красная).

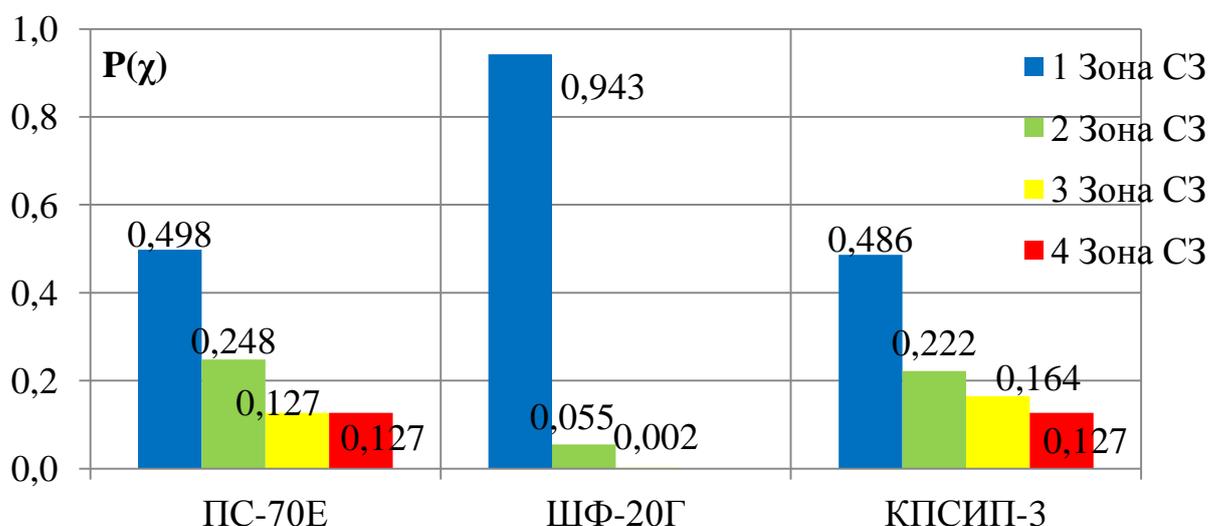


Рисунок 2.45 – Вероятностная оценка $P(\chi)$ работоспособности изоляционных конструкций в различных зонах степени загрязнения

По проведенным исследованиям установлена связь показателя СЗ с удельной поверхностной проводимостью χ (мкСм) изоляционных конструкций (изоляторов ШФ-20Г, ПС-70Е и кронштейна КПСИП-3) при толщине загрязнения $h = 0,0001 \div 1$ мм и удельной объемной проводимости увлажненного слоя загрязнения $\chi_v = 1 \div 2500$ мкСм/см. Дана вероятностная оценка $P(\chi)$ работоспособности изоляционных конструкций в различных зонах загрязнения, из которой определено, что полимерный кронштейн КПСИП-3 по своим численным значениям близок к изолятору ПС-70Е, который рекомендован к эксплуатации в 1 и 2 зонах при любых видах загрязнения [52]. Полимерный кронштейн – новый вид изоляционной конструкции не имеющий статистических данных об отказах, загрязнениях и т.д. Поэтому, можно предположить, что кронштейн КПСИП-3 также может быть рекомендован для эксплуатации в 1 и 2 зонах при любых видах загрязнения. Данное положение сопоставляется с результатами моделирования по формуле (2.56).

2.2.4 Вероятностная оценка перекрытия полимерного кронштейна, стеклянных и фарфоровых изоляторов воздушной ЛЭП при грозовых перенапряжениях

По упрощенной методике оценки числа отключений ВЛ 6–10 кВ из-за грозовых перенапряжений [122] определяется вероятность перекрытия линейной изоляции $P(I_M)$, которая рассчитывается по экспоненциальному закону распределения первых импульсов тока разрядов молнии [122]:

$$P(I_M) = \exp(-0,04I_M). \quad (2.69)$$

Критический ток молнии I_m для ВЛ на металлических и железобетонных опорах определяется по формуле [122]:

$$I_m = \frac{2U_{\text{ВИН}}}{Z}, \quad (2.70)$$

где $U_{\text{ВИН}}$ – выдерживаемое импульсное напряжение, кВ;

$Z_{\text{пр}}$ – волновое сопротивление провода.

Волновое сопротивление (без короны) одиночного провода рассчитывается по формуле [122, 123]:

$$Z_1 = 60 \ln(2h_{\text{cp}}/r), \quad (2.71)$$

где r – радиус провода, м.

Поправка на корону для волновых сопротивлений на ВЛ 6–10 кВ принимается равной 0,9. Тогда волновое сопротивление одиночного провода с учетом импульсной короны рассчитывается по формуле [122, 123]

$$Z_{\text{пр}} = 0,9Z_1. \quad (2.72)$$

На ВЛ используются кронштейны различного типа с соответствующими изоляторами. В таблице 2.18 представлены расчетные значения, выполненные по формулам 2.69–2.72. Следует отметить, что выдерживаемое импульсное напряжение $U_{\text{ВИН}}$ для изоляторов принято по [122], а для полимерного кронштейна определено экспериментально (исследования представлены в разделе 3.4). Вероятность перекрытия изоляции разрядом молнии представлена на рисунке 2.46.

Таблица 2.18 – Расчетные значения для линейной изоляции

Тип кронштейна/изолятора	$U_{\text{ВИН}}$, кВ	Z_1 , Ом	$Z_{\text{пр}}$, Ом	I_m , кА	$P(I_m)$
КВЛЦ-50/(ПС-70Е)	100	42,53	38,28	5,22	0,811
СИП-3п/(ПС-70Е)	100	42,53	38,28	5,22	0,811
М-2/(ШФ-20Г)	135	57,58	51,82	5,21	0,812
СИП-3/(ШФ-20Г)	135	57,58	51,82	5,21	0,812
КПСИП-3/(нет изоляторов)	180	47,04	42,34	8,51	0,711

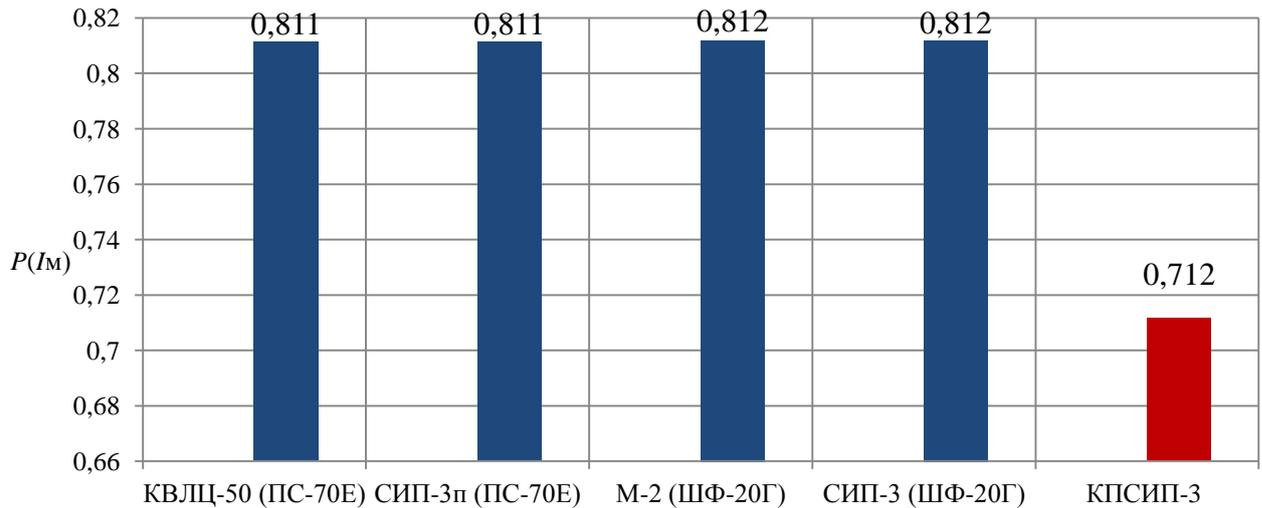


Рисунок 2.46 – Вероятность перекрытия линейной изоляции разрядом молнии

По проведенным расчетам следует, что вероятность перекрытия полимерного кронштейна ниже, чем у изоляторов, следовательно, можно предположить, что надежность воздушной линии с использованием полимерного кронштейна будет увеличена. Таким образом, возможна реализация перехода на малообслуживаемые линии, что является одним из перспективных направлений холдинга ОАО «РЖД». Также отмечено, что повышение надежности защиты от грозových перенапряжений ВЛ 6–10 кВ с железобетонными и металлическими опорами существенно повышается при использовании полимерных траверс, для которых практически безопасны индуктированные перенапряжения и поэтому не требуется защита от индуктированных грозových перенапряжений [122].

Выводы по второй главе

1. Разработаны положения расчета механической прочности полимерного кронштейна, позволяющие учитывать прогиб, максимальные напряжения в кон-

струкции при изменении статических и динамических нагрузок. На основании результатов расчетов определены геометрические размеры (диаметры траверсы и тяг, фазное и межфазные расстояния, точки крепления тяг к траверсе) в зависимости от прикладываемых нагрузок, сил тяжести каждого провода $G_i = 2,0 \div 3,0$ кН и воздействии аэродинамической силы $F_{rw} = 30 \div 100$ % от G_i . Определено, что при диаметре траверсы 4,6 см, диаметре тяг 2,5 см, длине межфазного расстояния 50 см полимерный кронштейн удовлетворяет требованиям по прогибу ($\delta_{\max} = 5,38$ мм $<$ $\delta_{\text{доп}} = 13,03$ мм), наибольшее эквивалентное динамическое напряжение $\sigma_{\text{эквд}} = 46,3$ МПа не превышает допустимое значение $\sigma_{\text{доп}} = 80$ МПа, таким образом, механическая прочность кронштейна обеспечена.

2. Определены направления анализа электрической прочности полимерного кронштейна для напряжений 6 и 10 кВ. Используя математическую модель для гладкостержневого изолятора, определено 50 %-ное разрядное напряжение в зависимости от степени загрязнения для полимерного кронштейна с диаметром траверсы 4,6 см и длиной межфазного расстояния 50 см. Из расчетов следует, что полимерный кронштейн может быть использован в 1 и 2 зонах степени загрязнения при напряжении 10 кВ, в 1 и 4 зонах СЗ для ВЛ 6кВ.

3. Исследования по определению численных значений удельной поверхностной проводимости показали, что полимерный кронштейн для ВЛ 10 кВ, при толщине слоя загрязнения в пределах $h = 0,0001 \div 1$ мм и удельной объемной проводимости увлажненного слоя загрязнения в диапазоне $\chi_v = 1 \div 2500$ мкСм/см, будет работать в 1 и 2 зонах загрязнения. Таким образом, подтверждается сходимость результатов с математическим моделированием гладкостержневого изолятора.

4. Определена вероятность перекрытия линейной изоляции разрядом молнии. У полимерного кронштейна вероятность $P(I_M) = 0,712$, что на 12 % меньше, чем у металлических кронштейнов с изоляторами.

3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

3.1 Разработка основных этапов по созданию полимерного кронштейна

Создание полимерного кронштейна для воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ и ввод его в серийное производство в общем случае описывается алгоритмом (рисунок 3.1) и содержит следующие этапы:

1. Изучение объекта (назначение; устройство; условия работы; основные возмущения, вызывающие изменения выходной величины).
2. Применение методик по расчету прочности полимерного кронштейна;
3. Формулировка основных требований, предъявляемых к устройству, по обеспечению выходных характеристик стандартизации и сертификации.
4. Изготовление физической модели полимерного кронштейна.
5. Экспериментальные исследования полимерного кронштейна в лабораторных условиях и внесение корректировок.
6. Опытная эксплуатация полимерного кронштейна в течение установленного техническими условиями периода времени.
7. Проведение диагностических мероприятий по выявлению нарушений в период опытной эксплуатации.
8. По результатам опытной эксплуатации внесение, если потребуется, корректировок в расчетные методики.
9. Рекомендации по вводу в эксплуатацию и запуску серийного производства полимерного кронштейна проводов.

На каждом этапе необходимо учитывать нормы и требования, предъявляемые к полимерному кронштейну, и особенно при проведении натуральных и эксплуатационных исследованиях.

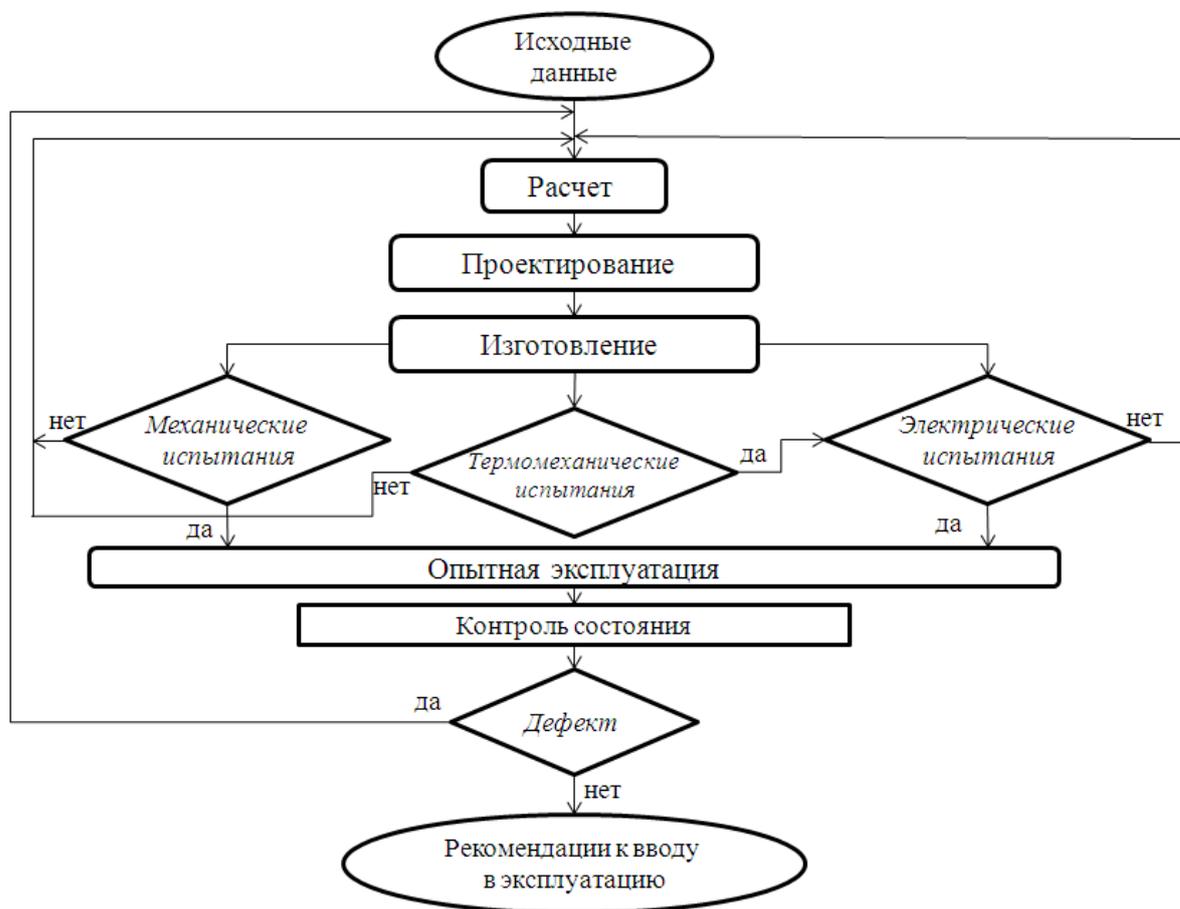
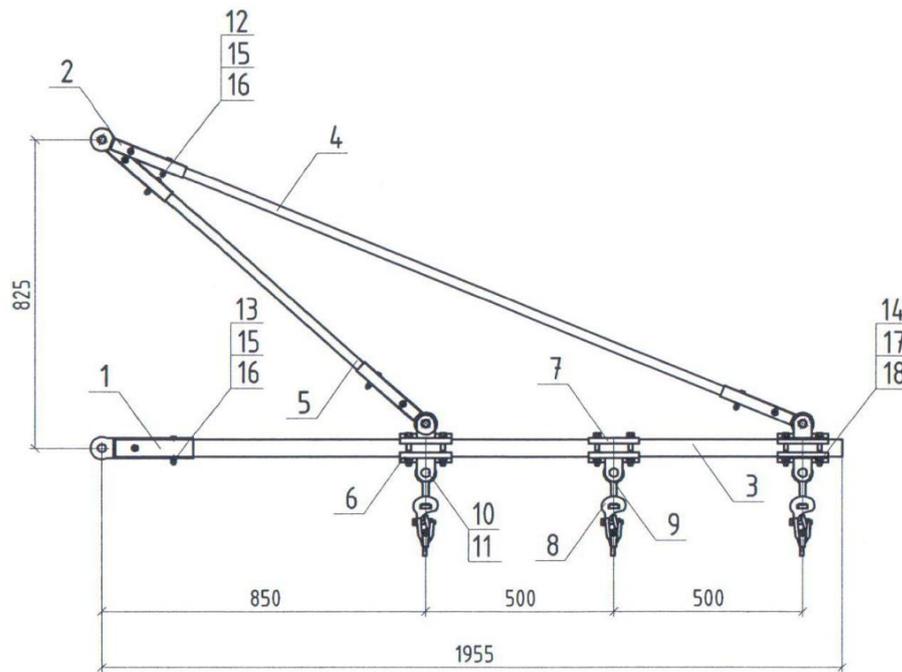


Рисунок 3.1 – Алгоритм разработки полимерного кронштейна

На основании проведенных теоретических исследований научно-исследовательским институтом транспортного строительства ОАО «ЦНИИС» разработана рабочая документация РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов» [138] (ПРИЛОЖЕНИЕ Б), в которой представлен кронштейн для самонесущих изолированных проводов с двумя тягами – КПСИП-3 (рисунок 3.2).

Критерии оценки качества изготовления, методов испытаний, приемки и эксплуатации определены в соответствии с разработанными техническими условиями «Кронштейны из полимерных материалов для контактной сети железных дорог» [139].



- 1 – оконцеватель траверсы; 2 – оконцеватель тяги; 3 – траверса; 4 – тяга первая;
 5 – тяга вторая; 6 – плашка нижняя (ЛЭЗ.42.1678-Ш); 7 – плашка (ЛЭЗ.42.2348);
 8 – седло одинарное под пестик (КС 009); 9 – серьга (КС 075);
 10 – валик 22×55 (КС 084); 11 – шплинт 5×40; 12 – болт М6×50; 13 – болт М6×70;
 14 – болт М12×75; 15 – гайка М6; 16 – шайба 6; 17 – гайка М12; 18 – шайба М12

Рисунок 3.2 – Полимерный кронштейн с двумя тягами КПСИП-3

3.2 Разработка методики и проведение экспериментальных исследований механической прочности полимерного кронштейна

Для подтверждения результатов теоретических расчетов необходимы экспериментальные исследования механической прочности полимерного кронштейна. В ходе подготовки к экспериментальным исследованиям необходимо опреде-

лить процедуру выполнения испытаний. В связи с этим разработать программу механических испытаний полимерного кронштейна, которая включает:

1. Требования к испытательному оборудованию:

– испытания кронштейнов нагружением для оценки показателей их прочности и жесткости следует производить на стенде для проведения механических испытаний. Стенд должен быть аттестован в установленном порядке в соответствии с [106];

– устанавливать величину усилия натяжения троса при испытаниях и проверять массу кронштейнов следует с помощью динамометра ДПУ-5-2 (дата поверки 17.06.13 годен до 17.06.14, дата проведения механических испытаний 24.03.2014 г., ПРИЛОЖЕНИЕ В) [140], основные технические характеристики которого приведены в таблице 3.1. Динамометр должен удовлетворять требованиям [141].

Таблица 3.1 – Технические характеристики динамометра ДПУ-5-2

Динамометр	Приделы измерений, кН		Цена деления, кН	Класс точности/погрешность
	max	min		
ДПУ-5-2	5,0	0,25	0,25	2 / ± 2 %

2. Схема проведения испытания.

Схемы испытаний кронштейнов для оценки показателей их прочности и жесткости должны соответствовать РД № 3320. Схемы испытания для узлов следует принимать по программе и методике испытаний на механическую прочность узлов и деталей контактной сети электрифицируемых дорог ЦНИИС [90].

3. Нормативные значения испытательной нагрузки.

Величины испытательных нагрузок P_k , определенные с учетом коэффициентов безопасности C , следует принимать в соответствии с РД № 3320. Величины нагрузок необходимо устанавливать в соответствии с [90].

4. Этапы проведения испытаний с указанием прикладываемой нагрузки:

– нагрузки P_k следует прикладывать поэтапно ступенями с шагом $0,2 \times P_k$. До начала проведения испытаний следует произвести предварительное нагружение испытательной системы нагрузкой не более $0,4 \times P_k$;

– узел крепления нагружают до значения $1,0 \times P_k$, при этом нагрузку каждой ступени выдерживают по 5 мин [90]. После достижения значения нагрузки $1,0 \times P_k$, нагрузку выдерживают 15 мин [90], затем после приложения следующих ступеней нагрузку выдерживают по 5 мин до значения $1,5 \times P_k$ [90].

5. Определение величины прогиба элементов кронштейна.

Определение величины прогиба элементов кронштейна в плоскости приложения контрольной нагрузки выполняется с точностью до 1 мм методами установленными в п. 5.4 [139]. Величину прогибов элементов необходимо определять для значения расчетной нагрузки $1,0 \times P_k$ [90].

6. Критерии оценки механической прочности.

Кронштейн считается выдержавшим испытания, если не произошло смещения оконцевателей, деформации или растрескивания кронштейна в соответствии с [139]. Величина прогиба не должна превышать соотношения 1/150 согласно [48].

Испытания механической прочности полимерного кронштейна проводились на основании технических условий [139], по [138] выполнены опытные образцы кронштейнов серии СИП (СИП-1, СИП-3), механические свойства которых определены в испытательном центре «ЦНИИС-ЭлЖТ» ОАО ЦНИИС г. Москва (рисунок 3.3). ИЦ «ЦНИИС-ЭлЖТ» проводит сертификационные испытания опорных, поддерживающих конструкций и арматуры контактной сети железных дорог и имеет аккредитацию Федеральной службы РОСАККРЕДИТАЦИЯ № РОСС RU.001.22ЖТ15. Аттестат аккредитации действителен до 20 июля 2017 г.

Ход испытаний включал в себя следующие этапы:

– проверка комплектности и внешнего вида: все узлы укомплектованы в соответствии с РД. Качество деталей удовлетворительное. Толщина защитного покрытия металлических элементов изделий, измеренная с помощью толщиномера «Константа 5» в нескольких точках, составляет от 100 до 130 мкм;

– проверка размеров и сопрягаемости: основные размеры всех изделий соответствуют РД. Сопрягаемость узлов друг с другом и на опоре – удовлетворительная;

– проверка механической прочности.

Схемы приложения нагрузок к каждому узлу представлены в ПРИЛОЖЕНИИ В.

Величины нагрузок и схемы испытания для узлов приняты по [90].



Рисунок 3.3 – Фрагмент механических испытаний кронштейна серии СИП-Т-3 в испытательном центре «ЦНИИС-ЭлЖТ» ОАО ЦНИИС

Результаты испытаний оформлены протоколом (ПРИЛОЖЕНИЕ В).

Так как полимерный кронштейн с одной тягой допустил незначительные отклонения от нормативных значений, в РД № 3320 внесены конструктивные изменения, направленные на выполнение требований, разработанных в методике расчета механической прочности полимерного кронштейна.

После корректировки РД № 3320 выполнен опытный образец полимерного кронштейна КПСИП-3 с двумя тягами, механические свойства которого определены также в испытательном центре «ЦНИИС-ЭлЖТ» ОАО ЦНИИС г. Москва (рисунок 3.4).



Рисунок 3.4 – Фрагмент механических испытаний полимерного кронштейна КПСИП-3 в испытательном центре «ЦНИИС-ЭлЖТ» ОАО ЦНИИС

Результаты испытаний оформлены протоколом (ПРИЛОЖЕНИЕ Г).

Заключение комиссии. Кронштейн КПСИП-3 выдержал механические испытания и может быть рекомендован к опытной эксплуатации на объектах ОАО «РЖД».

3.3 Разработка методики и проведение экспериментальных исследований электрической прочности полимерного кронштейна в загрязненном и увлажненном состоянии

Экспериментальные исследования электрической прочности полимерного кронштейна подробно описаны программой электрических испытаний (ПРИЛОЖЕНИЕ Д) и представлены в [142]. Цель испытаний – оценка электрической прочности полимерного кронштейна в загрязненном и увлажненном состоянии. Объект испытаний – полимерный кронштейн КПСИП-3.

Испытания проводятся на укороченных образцах траверсы кронштейна, равных длине межфазного участка полимерного кронштейна (так как этот участок находится в более жестких условиях, рисунок 2.35), которые устанавливаются в горизонтальном положении в соответствии с их рабочим положением согласно [116]. Для проведения электрических испытаний был изготовлен испытательный стенд. Стенд представляет собой короб, дно и боковые стенки изготовлены из непрозрачного материала, лицевая и задняя стенки – из оргстекла. В крышке зафиксированы проходные изоляторы (рисунок 3.5, а). Для изоляции корпуса стенда от испытуемого образца применены стеклянные подвесные изоляторы ПСД-70Е. Через проходные изоляторы, с помощью высоковольтных проводов (провода свечей зажигания $U_{max} = 45$ кВ), на один конец образца подавалось переменное напряжение промышленной частоты 50 Гц с помощью АИД-70Ц (свидетельство RU.C.34.004 А № 32401, срок поверки – годен до 11.07.2018 г.) [143], другой был присоединен к заземлению. В процессе испытаний определялось имитируемое, межфазное, напряжение, возникающее на полимерном кронштейне КПСИП-3. С целью создания адвективного тумана применен ультразвуковой увлажнитель воздуха, через сопло которого заполнялся испытательный стенд (рисунок 3.5, б). Измерение интенсивности увлажнения осуществлялось с помощью гигрометра психрометрического ВИТ-1 и измерителя влажности и температуры ТКА-ТВ (свидетельство о поверке ФБУ Уралтест № 734809 срок поверки – годен до 06.11.2016 г.).

Так как по условиям [52, 116, 117, 119] изоляционные свойства изоляционной конструкции характеризуются удельной поверхностной проводимостью χ (мкСм) и 50 %-ным напряжением ($U_{50\%}$), определяемым при различной степени загрязнения и увлажнения, в процессе электрических испытаний полимерного кронштейна в загрязненном и увлажненном состояниях определяются: удельная поверхностная проводимость изоляционных частей; 50 %-ное разрядное напряжение. Исследования проводились в соответствии с [116, 119] по программе испытаний (ПРИЛОЖЕНИЕ Д). В соответствии с [116] использовались загрязняющие методы:

- ПЗ – предварительного загрязнения;
- СТ – соленого тумана.

При методе ПЗ в качестве загрязнителя использовалась суспензия – 40 г каолина, 1000 г воды, необходимое количество соли (NaCl). Пределы количества NaCl были следующие: 1) – 5 г; 2) – 20 г; 3) – 40 г.

При методе СТ: 1) – 20 г NaCl на 1000 г воды (средняя концентрация солености морей России); 2) – 224 г NaCl на 1000 г воды (максимальная концентрация по [116]).

Взвешивание загрязнителя произведено с помощью весов лабораторных квадрантных ВЛКТ-500 (свидетельство о поверке ФБУ Уралтест № 734809 срок поверки годен до 06.11.2016 г.).

а)



б)



а) – общий вид; б) – стенд заполненный туманом

Рисунок 3.5 – Испытательный стенд

Испытания проводились на образцах без оболочки и с защитной оболочкой. Защитная оболочка представляет собой композицию, состоящую из низкомолекулярного каучука СКТН вязкотекучей консистенции компаунда Виксинт ПК-68 [144] и катализатора холодного отверждения № 68 [145]. Данное покрытие широко используется в качестве защитных оболочек у отечественных производителей электроизоляционного оборудования, длительно работающего в среде воздуха и в условиях повышенной влажности в интервале температур от минус 60 до плюс 200 °С. Мягкость и эластичность компаунда позволяют применять его для герметизации изделий из ферритов и пермаллоев. Прозрачность компаунда допускает легко производить дефектацию и ремонт устройств, покрытых компаундом [144].

По пункту 3.7 [116] при испытаниях загрязненной изоляционной конструкции использован метод ПД – метод длительного приложения напряжения к испытываемому образцу с последующим его увлажнением или к чистому с последующим осаждением соленого тумана. К образцам при помощи аппарата испытания диэлектриков цифрового АИД-70Ц подавалось переменное напряжение $U = 23$ кВ ($\pm 0,1$ кВ). В процессе испытаний фиксировался ток утечки. По полученным данным построены зависимости тока от времени (рисунок 3.6). Согласно [116] время проведения испытания должно составлять не менее 30 минут. На поверхности образцов наблюдались частичные разряды, при этом перекрытия образцов не зафиксированы.

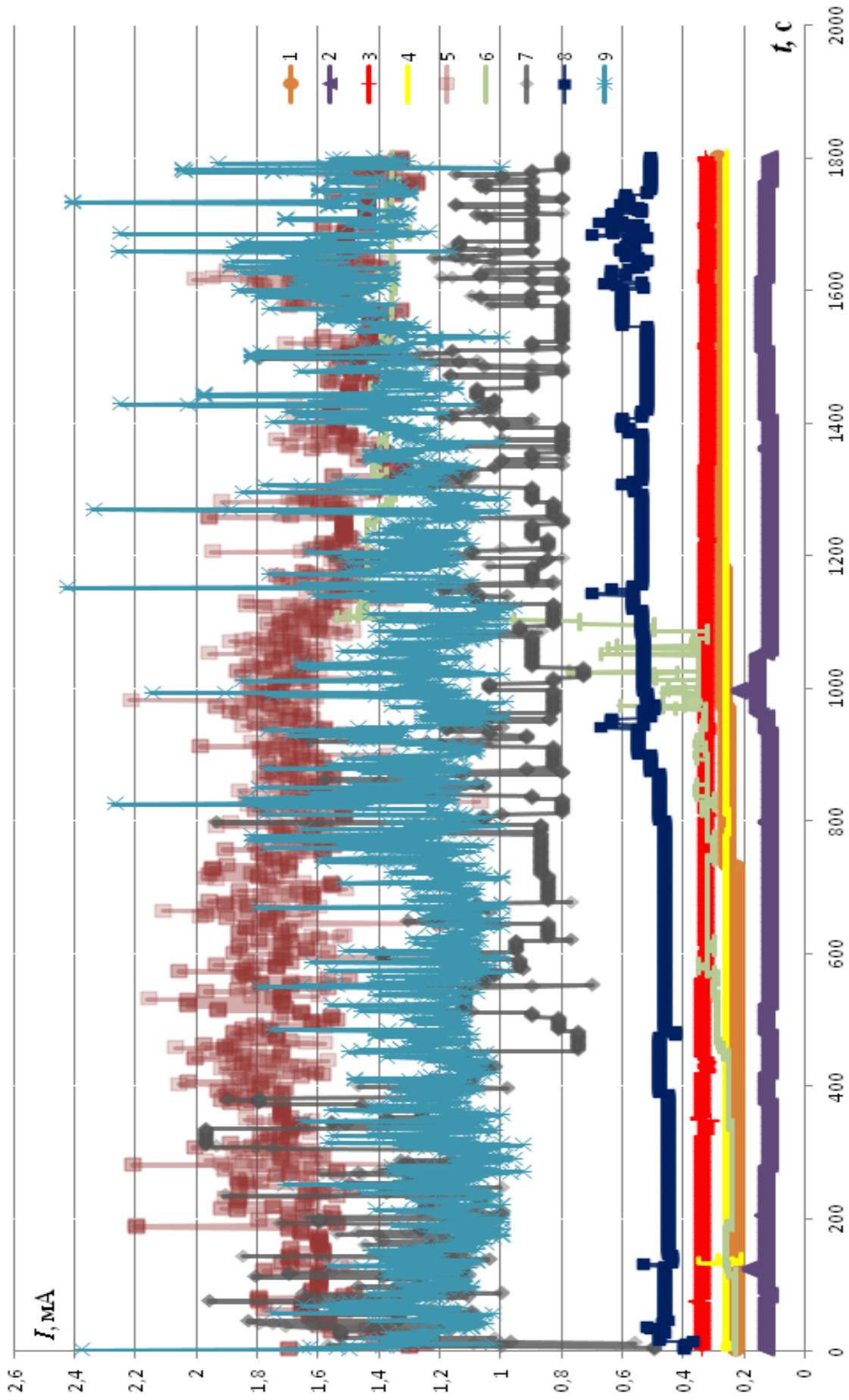


Рисунок 3.6 – Диаграмма токов

На рисунке 3.6 показаны: 1 – чистый образец без оболочки, без увлажнения; 2 – чистый образец в оболочке, без увлажнения; 3 – образец без оболочки, загрязненный 40 г каолина, 20 г NaCl, без увлажнения; 4 – образец в оболочке, загрязненный 40 г каолина, 20 г NaCl, без увлажнения; 5 – образец без оболочки, загрязненный 40 г каолин, 20г NaCl, увлажненный; 6 – образец в оболочке, загрязненный 40 г каолина, 20 г NaCl, увлажненный; 7 – образец без оболочки, загрязненный 40 г каолин, 40 г NaCl, увлажненный; 8 – образец в оболочке, загрязненный 40г каолина, 40 г NaCl, увлажненный; 9 – образец в оболочке, соленый туман 224 г/л.

Следующим этапом исследований было определение удельной поверхностной проводимости. На чистые образцы (без оболочки и с оболочкой) путем окунания (полного погружения) в загрязняющую суспензию наносилось загрязнение. Степень загрязненности задавалась в соответствии с [116, 119] 40 г каолина, необходимое количество NaCl на 1000 г воды. Испытуемый образец помещался в испытательную камеру, где постепенно увлажнялся в течение 30 минут, согласно [116] (по [119] не менее 20 минут). С помощью прибора *MIC10k* (свидетельство о поверке № ПРВ1-В40278, срок поверки – годен до 19.10. 2016 г.) [146] измерялись значения поверхностного сопротивления и тока утечки. В процессе увлажнения соответственно R уменьшалось, I увеличивалось. По истечении времени насыщения измеряемые величины фиксировались. Далее на испытуемый образец, при данном увлажнении и загрязнении, подавалось переменное напряжение 2,5 кВ (по [119] – 5 кВ на метр, так как испытуемые образцы 0,5 м, напряжение подавалось 2,5 кВ) и фиксировался ток утечки.

Путем расчета, в соответствии с [117], определялась поверхностная проводимость $G = I/U$ (где U – значение приложенного к изолятору напряжения; I – значение тока утечки на испытуемом образце). Удельная поверхностная проводимость определялась путем умножения значения поверхностной проводимости (G) на коэффициент формы изоляционной конструкции (K_{ϕ}). Так как коэффициент формы гладкого цилиндрического профиля $K_{\phi} = 1$, то удельная поверхностная

проводимость $\chi = G$. По проведенным исследованиям получены значения χ , которые приведены в таблице 3.2.

Далее опыты проводились методом СТ – соленым туманом, согласно [108]. Полученные значения удельной поверхностной проводимости (χ) при различной степени загрязнения и увлажнения приведены в таблице 3.2. Также исследован образец с преднамеренно поврежденной защитной оболочкой, повреждения обведены маркером (рисунок 3.7), получены значения χ приведены в таблице 3.2.



Рисунок 3.7 – Образец полимерного кронштейна с поврежденной защитной оболочкой

Для сравнения проведены исследования электрической прочности подвесных стеклянных изоляторов ПС-70Е (коэффициент формы изолятора $K_f = 0,79$ в соответствии с Инструкцией по эксплуатации изоляции электроустановок в районах с загрязненной атмосферой [121]), полученные данные сведены в таблицу 3.2. На рисунке 3.8 представлено крепление изолятора ПС-70Е на испытательном стенде с подведением испытательных проводов.



Рисунок 3.8 – Крепление изолятора ПС-70Е на испытательном стенде

Таблица 3.2 – Удельная поверхностная проводимость

Номер опыта	Метод загрязнения	Показания приборов		χ , мкСм	
		ММС 10000k	АИД-70Ц	ММС 10000k	АИД-70Ц
1	Без оболочки чистый (увлажненный без загрязнения)	$I = 7,08 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 22,3 \text{ МОм}$	$I = 0,16 \text{ мА}$ $U = 2500 \text{ В}$ $R = 15,6 \text{ МОм}$	0,04	0,064
2	В оболочке чистый (увлажненный без загрязнения)	$I = 38,5 \text{ нА}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 4,1 \text{ ГОм}$	$I = 0,002 \text{ мА}$ $U = 2500 \text{ В}$ $R = 1,25 \text{ ГОм}$	0,00024	0,0008
3	Без оболочки 40 г каолина 5 г NaCl	$I = 8,78 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 18 \text{ МОм}$	$I = 0,18 \text{ мА}$ $U = 2500 \text{ В}$ $R = 13,8 \text{ МОм}$	0,055	0,072
4	В оболочке 40 г каолина 5 г NaCl	$I = 85,3 \text{ нА}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 1,85 \text{ ГОм}$	$I = 0,002 \text{ мА}$ $U = 2500 \text{ В}$ $R = 1,25 \text{ ГОм}$	0,00054	0,0008
5	Без оболочки 40 г каолина 20 г NaCl	$I = 0,15 \text{ мА}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 1,06 \text{ МОм}$	$I = 2,91 \text{ мА}$ $U = 2800 \text{ В}$ $R = 962,2 \text{ кОм}$	0,95	1,04
6	В оболочке 40 г каолина 20 г NaCl	$I = 7,01 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 22,5 \text{ МОм}$	$I = 0,14 \text{ мА}$ $U = 2800 \text{ В}$ $R = 20,0 \text{ МОм}$	0,044	0,05
7	Без оболочки 40 г каолина 40 г NaCl	$I = 0,43 \text{ мА}$ $U = 157 \text{ В}$ $R = 370 \text{ кОм}$	$I = 7,79 \text{ мА}$ $U = 2400 \text{ В}$ $R = 308 \text{ кОм}$	2,74	3,24
8	В оболочке 40 г каолина 40 г NaCl	$I = 20,9 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 7,55 \text{ МОм}$	$I = 0,47 \text{ мА}$ $U = 2400 \text{ В}$ $R = 5,32 \text{ МОм}$	0,13	0,188
9	В оболочке (дефект оболоч.) 40 г каолина 40 г NaCl	$I = 61,0 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 2,59 \text{ МОм}$	$I = 0,87 \text{ мА}$ $U = 2500 \text{ В}$ $R = 2,87 \text{ МОм}$	0,38	0,348
10	ПС-70Е 40 г каолина 40 г NaCl	$I = 0,45 \text{ мА}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 354 \text{ кОм}$	$I = 8,0 \text{ мА}$ $U = 2800 \text{ В}$ $R = 350 \text{ кОм}$	$2,84 \cdot 0,79 = 2,25$	$2,85 \cdot 0,79 = 2,257$
11	В оболочке 100 г каолина 40 г NaCl	$I = 64,7 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 2,43 \text{ МОм}$	$I = 1,29 \text{ мА}$ $U = 2500 \text{ В}$ $R = 1,93 \text{ МОм}$	0,41	0,51
12	Без оболочки метод СТ 20 г NaCl на 1000 г воды	$I = 0,43 \text{ мА}$ $U = 157 \text{ В}$ $R = 370 \text{ кОм}$	$I = 7,26 \text{ мА}$ $U = 2600 \text{ В}$ $R = 358 \text{ кОм}$	2,74	2,79
13	В оболочке солёный туман 20 г NaCl на 1000 г воды	$I = 38,8 \mu\text{A}$ $U = 5245 \text{ В}$ $R = 138 \text{ МОм}$	$I = 0,02 \text{ мА}$ $U = 2400 \text{ В}$ $R = 120 \text{ МОм}$	0,007	0,008
14	Без оболочки метод СТ 224 г NaCl на 1000 г воды	$I = 8,78 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 61 \text{ кОм}$	$I = 4,58 \text{ мА}$ $U = 400 \text{ В}$ $R = 87,3 \text{ кОм}$	16,39	11,45
15	В оболочке метод СТ 224 г NaCl на 1000 г воды	$I = 2,63 \mu\text{A}$ $U = 158 \text{ В}$ $R = 56,6 \text{ МОм}$	$I = 0,12 \text{ мА}$ $U = 2500 \text{ В}$ $R = 20,8 \text{ МОм}$	0,017	0,048
16	ПС-70Е метод СТ 224 г NaCl на 1000 г воды	$I = 1,21 \text{ мА}$ $U = 83 \text{ В}$ $R = 70 \text{ кОм}$	$I = 5,06 \text{ мА}$ $U = 400 \text{ В}$ $R = 79,05 \text{ кОм}$	$14,5 \cdot 0,79 = 11,5$	$12,65 \cdot 0,79 = 10$
17	ПС-70Е метод СТ 20 г NaCl на 1000 г воды	$I = 0,95 \text{ мА}$ $U = 263 \text{ В}$ $R = 263 \text{ кОм}$	$I = 8,54 \text{ мА}$ $U = 2600 \text{ В}$ $R = 304,4 \text{ кОм}$	$3,6 \cdot 0,79 = 2,84$	$3,28 \cdot 0,79 = 2,6$

После определения удельной поверхностной проводимости, согласно [52, 116, 119], определялось 50 % -ное напряжение. Величина требуемого $U_{50\%}$, с учетом коэффициента запаса, для межфазного напряжения должна составлять 23 кВ.

Опыты проводились в последовательности, представленной в таблице 3.3. Исследования по определению $U_{50\%}$ для опытов 1–4 не проводились, так как при загрязнениях, 40 г каолина и до 5 г NaCl подавалось переменное напряжение до возможности получить перекрытие испытуемых образцов, однако, вследствие увлажнения, перегорали высоковольтные провода, максимальная величина приложенного напряжения ($U_{\text{прилmax}}$) составила 46 кВ. Из опытов определено, что данная концентрация не влияет на изоляционные свойства стеклопластика СПП-ЭИ(Н) и не снижает U перекрытия.

Таблица 3.3 – Определение $U_{50\%}$

№ Опыта	Метод загрязнения	Воздействующее напряжение U , кВ	Номер воздействия												$U_{50\%} = \frac{\sum_{i=1}^k n_i \cdot U_i}{N},$ кВ
			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
1-4		46	Требуемая величина $U_{50\%} = 23$ кВ обеспечена												$U_{50\%} > 23$ кВ
5	ПЗ без оболочки 40 г каолина 20 г NaCl	23	о												$U_{50\%} > 23$ кВ
		25		о											
		27			о										
		30				о	о								
		Далее опыт не проводился, так как требуемая величина $U_{50\%} = 23$ кВ обеспечена													
6	ПЗ воблочке 40 г каолина 20 г NaCl	23	о											$U_{50\%} > 23$ кВ	
		25		о											
		27			о										
		30				о	о								
		Далее опыт не проводился, так как требуемая величина $U_{50\%} = 23$ кВ обеспечена													

Продолжение таблицы 3.3

7	ПЗ без оболочки 40 г каолина 40 г NaCl	30	X													$U_{50\%} = 25,9\text{кВ}$	
		29		X													X
		27			X						X						O
		25				X		X			O						O
		23					O		O								
8	ПЗ в оболочке 40 г каолина 40 г NaCl	23	O													$U_{50\%} > 23\text{кВ}$	
		25		O													
		27			O												
		30				O	O										
Далее опыт не проводился, так как требуемая величина $U_{50\%} = 23\text{кВ}$ обеспечена																	
9	ПЗ в оболочке (дефект оболоч.) 40 г каолина 40 г NaCl	23	O													$U_{50\%} > 23\text{кВ}$	
		25		O													
		27			O												
		30				O	O										
Далее опыт не проводился, так как требуемая величина $U_{50\%} = 23\text{кВ}$ обеспечена																	
10	ПЗ ПС-70Е 40 г каолина 40 г NaCl	23	X													$U_{50\%} = 12,0\text{кВ}$	
		20		X													
		18			X												
		16				X											
		14					X					X					
		12						X			O		X		X		
11	ПЗ в оболочке 100 г каолина 40 г NaCl	23	O													$U_{50\%} > 23\text{кВ}$	
		25		O													
		27			O												
		30				O	O										
Далее опыт не проводился, так как требуемая величина $U_{50\%} = 23\text{кВ}$ обеспечена																	
12	СТ 20 г/л без оболочки	23	X						X							$U_{50\%} = 19,5\text{кВ}$	
		20		X		X		O		X		X					
		18			O		O				O		X				
		16													O		
13	СТ 20 г/л в оболочке	23	O													$U_{50\%} > 23\text{кВ}$	
		25		O													
		27			O												
		30				O	O										
Далее опыт не проводился, так как требуемая величина $U_{50\%} = 23\text{кВ}$ обеспечена																	

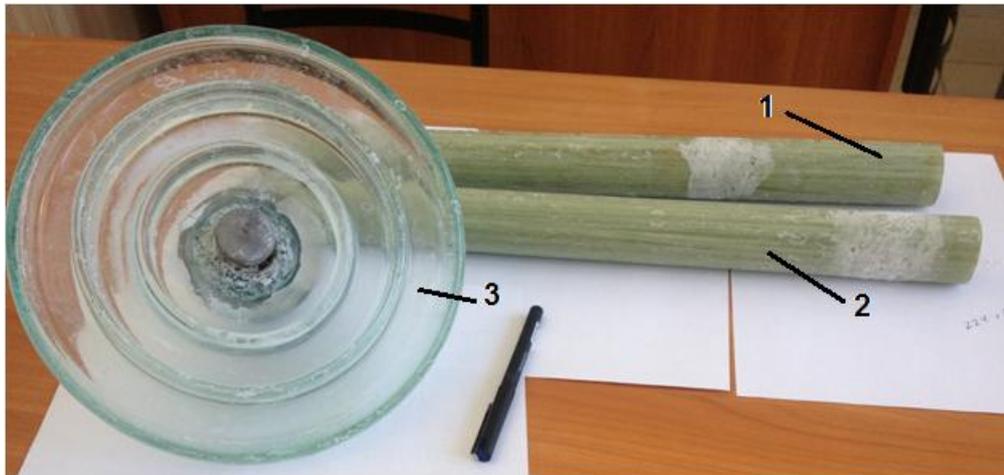
Окончание таблицы 3.3

14	СТ 224 г/л без оболочки	23	X											$U_{50\%} = 11,14 \text{ кВ}$
		20		X										
		18			X									
		16				X								
		14					X							
		12						X		X	X		X	
		10							О			О	О	
15	СТ 224 г/л в оболочке	23	О										$U_{50\%} > 23 \text{ кВ}$	
		25		О										
		27			О									
		30				О	О							
		Далее опыт не проводился, так как требуемая величина $U_{50\%} = 23 \text{ кВ}$ обеспечена												
16	ПС-70Е соленый туман 224 г NaCl на 1000 г воды	23	X										$U_{50\%} = 9,0 \text{ кВ}$	
		20		X										
		18			X									
		16				X								
		14					X							
		12						X						
		10							X		X			
		9								О		X		X
8										О	О			
17	ПС-70Е соленый туман 20 г NaCl на 1000 г воды	23	X										$U_{50\%} = 12,5 \text{ кВ}$	
		20		X										
		18			X									
		16				X								
		14					X				X	X		
		12						X		О		О		О
		10							О					

По проведенным исследованиям определено, что самый тяжелый режим работы изоляции – режим при соленом тумане. На рисунке 3.9 представлены образцы после испытания методом СТ с концентрацией NaCl 224 г/л.

Процесс перекрытия изоляционных конструкций полностью совпадает с принципом, описанным в разделе 2.2.3.

На основании проведенных исследований по таблицам 3.2 и 3.3 построены зависимости удельной поверхностной проводимости (рисунок 3.10) и значений $U_{50\%}$ (рисунок 3.11).



- 1 – образец полимерного кронштейна в защитной оболочке;
 2 - образец полимерного кронштейна без защитной оболочки;
 3 – подвесной стеклянный изолятор ПС-70Е

Рисунок 3.9 – Образцы испытанные методом СТ:

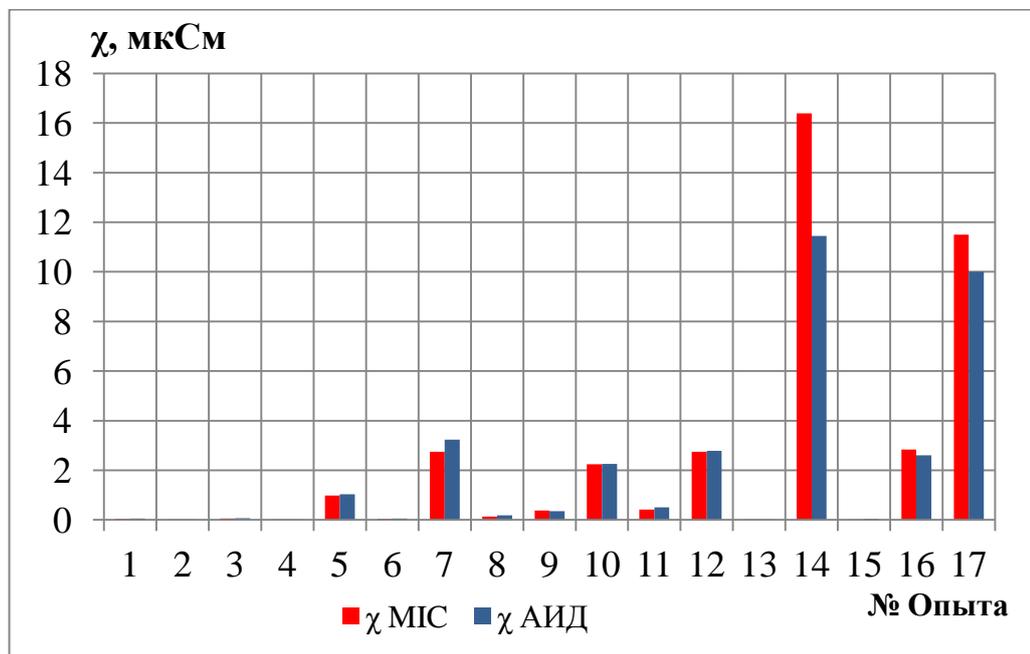
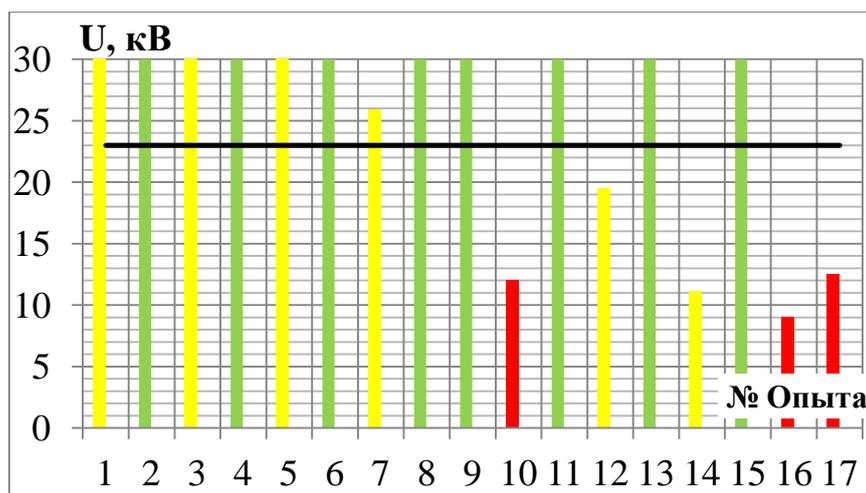


Рисунок 3.10 – Удельная поверхностная проводимость



- █ – образец без защитной оболочки; █ – образец в защитной оболочке;
█ – стеклянные изолятор ПС-70Е; █ – нормативное значение 50 %-ного напряжения для ВЛ 10 кВ ($U_{50\%} = 23$ кВ)

Рисунок 3.11 – 50 %-ное напряжение

По проведенным исследованиям определено, что полимерный кронштейн, выполненный из стеклопластика профильного электроизоляционного СПП-ЭИ(Н), цилиндрической гладкой формы, предназначенный для эксплуатации на воздушных линиях продольного электроснабжения напряжением 6–10 кВ, без защитной оболочки может применяться в 1 и 2 зонах. С применением защитной оболочки Виксинт ПК-68 изоляционные качества стеклопластика СПП-ЭИ(Н) повышаются, что позволяет расширить зоны применения полимерного кронштейна с 1 по 4 зоны загрязнения.

Также отмечено, что незначительное повреждение защитной оболочки не оказывает влияния на изоляционные свойства конструкции.

Результаты электрических испытаний оформлены протоколом (ПРИЛОЖЕНИЕ Д).

Заключение комиссии. Кронштейн КПСИП-3 выдержал электрические испытания и может быть рекомендован к опытной эксплуатации на объектах ОАО «РЖД».

3.4 Разработка методики и проведение экспериментальных исследований термомеханической прочности полимерного кронштейна

Полимерный кронштейн должен обладать как механической, так и электрической прочностью. В связи с этим на основании [109] полимерный кронштейн должен выдержать термомеханические испытания с последующими электрическими испытаниями: кратковременным напряжением и воздействием импульсного напряжения с крутым фронтом [139].

Проведение экспериментальных исследований термомеханической прочности полимерного кронштейна подробно описано в программе испытаний (ПРИЛОЖЕНИЕ Е) и в [147]. Цель испытаний – исследование и оценка напряженного состояния (перемещения) полимерного кронштейна при действии статической нагрузки в различных климатических режимах, регистрация и анализ изменения поверхностных емкостей и сопротивлений на межфазных участках кронштейна, а также испытания кронштейна кратковременным, повышенным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью и испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом. Объект испытаний – полимерный кронштейн КПСИП-3 в защитной оболочке Висксинт ПК-68.

Проведение испытаний было разделено на три этапа:

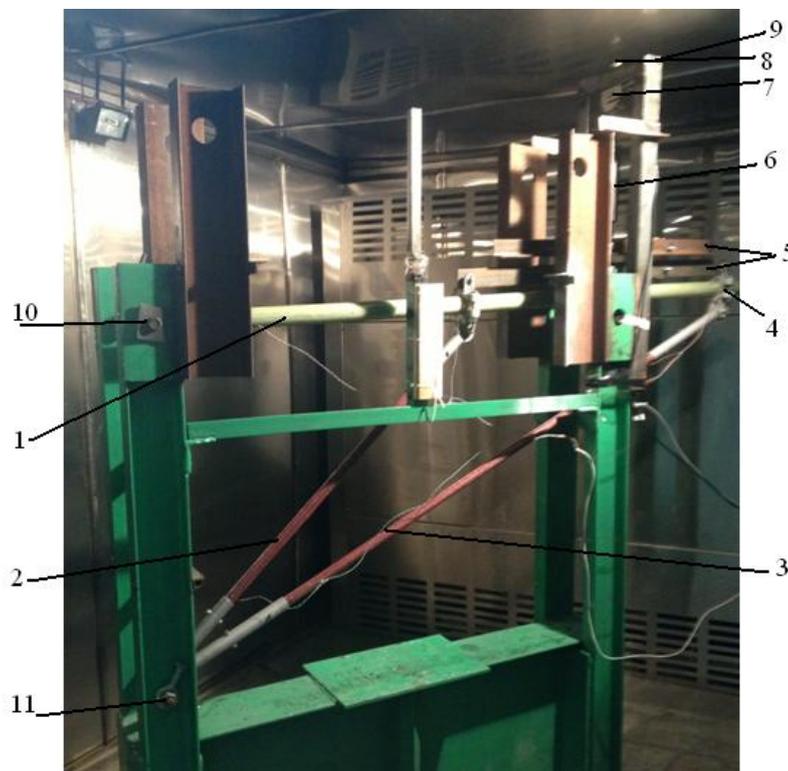
1. Термомеханические испытания.
2. Электрические испытания кратковременным напряжением промышленной частоты в сухом состоянии.
3. Электрические испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом.

Термомеханические испытания проводились в климатической камере *Techno7010W_i* (Протокол № 567/2014 от 02.10.2014, годен до 02.10.2015) «ИЦ

ТСЖТ УрГУПС» [102], основные технические характеристики камеры приведены в таблице 1.3.

В ходе термомеханических испытаний полимерного кронштейна определялись следующие показатели: смещение оконцевателей, деформация или растрескивание, прогиб сжато-изогнутых элементов, а также регистрация и анализ изменения поверхностных емкостей и сопротивлений на межфазных участках кронштейна при изменении температуры.

В климатической камере «ИЦ ТСЖТ УрГУПС» на испытательном стенде смонтирован кронштейн (рисунок 3.12).



- 1 – траверса; 2 – тяга (1); 3 – тяга (2); 4 – узел крепления проводов;
 5 – металлическая балка (уголок); 6 – стяжной зажим (талреп); 7 – динамометр;
 8 – болт; 9 – опорная плита; 10 – узел крепления траверсы;
 11 – узел крепления тяг

Рисунок 3.12 – Внешний вид испытательного стенда внутри климатической камеры

Испытания на термомеханическую прочность проводились воздействием на кронштейн четырех 24-часовых циклов охлаждения и нагрева от минус 60 °С до плюс 50 °С и последующего охлаждения до температуры окружающего воздуха с одновременным приложением механической силы, равной P_k , которая оставалась постоянной в течение каждого цикла испытаний. Механическая нагрузка прикладывалась к кронштейну перед началом каждого цикла температурного воздействия при нормальных атмосферных условиях ($t_0 = 20$ °С, $P_0 = 760$ мм рт. ст., $h_0 = 11$ г/м³) в соответствии с [110] и полностью снималась в конце цикла. Минимальная и максимальная температура рабочей среды была выдержана в течение не менее 4 часов температурного цикла, как показано на рисунке 3.13, в соответствии с [109]. Величины нагрузок и схемы испытания для узлов приняты по [138]. Схема приложения нагрузок к каждому узлу представлена на рисунке 3.14.



Рисунок 3.13 – Температурный цикл испытаний

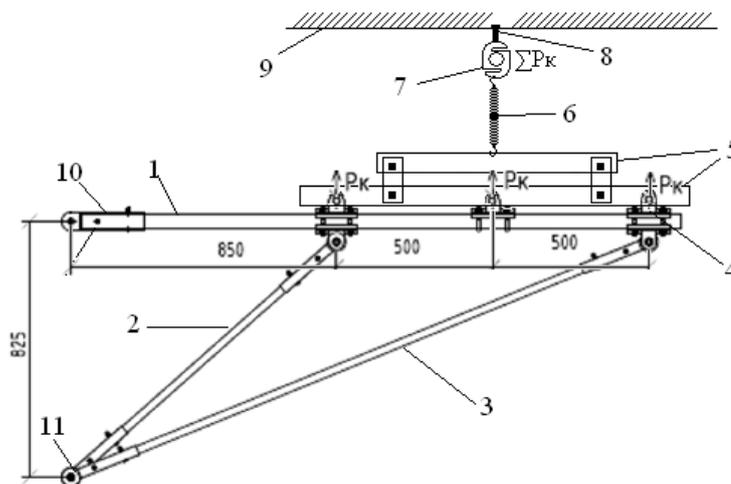
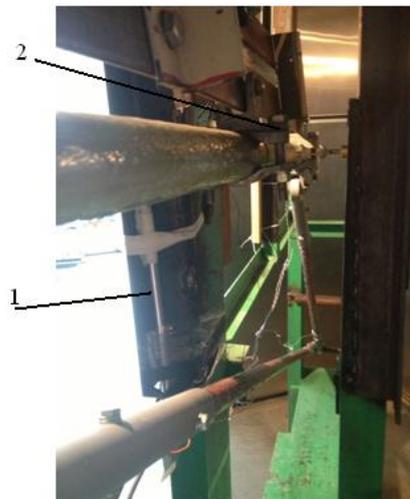


Рисунок 3.14 – Схема приложения нагрузок P_k к кронштейну КПСИП-3

На рисунке 3.14 показаны: 1 – траверса; 2 – тяга(1); 3 – тяга(2); 4 – узел крепления проводов; 5 – металлическая балка (уголок); 6 – стяжной зажим (талреп); 7 – динамометр; 8 – болт; 9 – опорная плита; 10 – узел крепления траверсы; 11 – узел крепления тяг.

Для обеспечения нагрузки $P_k = 1,7$ кН [138] (рисунок 3.14) для каждого узла фиксации проводов на стенде путем соединения металлических балок (уголков) – 5, при помощи стяжного зажима (талрепа) – 6, через динамометр – 7, зафиксированный болтом – 8 к опорной плите – 9, устанавливается суммарная распределенная нагрузка $\sum P_k = 5,1$ кН.

Для регистрации перемещения использовался комплекс «Spider 8», датчик перемещения «Spider 8» был закреплен на раме стенда и на траверсе кронштейна, в зоне второго зажима (рисунок 3.15).



1 – датчик; 2 – планка датчика

Рисунок 3.15 – Датчик перемещения «Spider 8», закрепленный на испытательном стенде

Для определения поверхностных сопротивлений и емкостей кронштейна при термомеханических испытаниях кронштейн был разделен на участки (1–2, 2–

3, 3–4, 4–5, 6–8, 7–9) относительно узлов крепления измерительных проводников (рисунок 3.16).

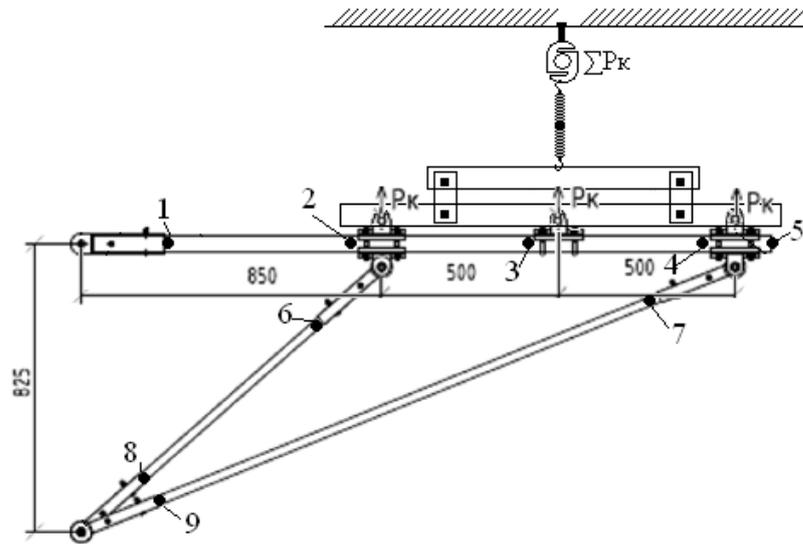


Рисунок 3.16 – Схема присоединения измерительных проводников к элементам кронштейна

Регистрация поверхностных сопротивлений и емкостей проводилась с помощью мобильного прибора диагностики электрических машин и аппаратов «Доктор-060Z» и цифрового тераомметра MIC-5000. К каждому из обозначенных узлов (рисунок 5.17) прикрепляются проводники, которые выводятся из климатической камеры (рисунок 3.17).

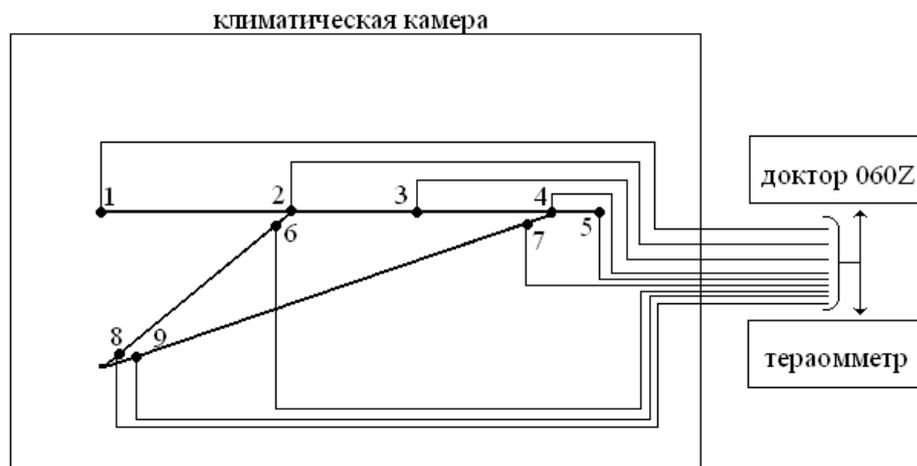


Рисунок 3.17 – Схема соединения проводников в узлах кронштейна

По итогам термомеханических испытаний полимерного кронштейна на прочность получены следующие результаты:

1. Смещение оконцевателей не зафиксировано.
2. Деформации или растрескивания (металлических и стеклопластиковых элементов кронштейна) не зафиксировано.
3. Прогиб траверсы составил $\Delta h = 7,5$ мм, что не превышает $1/150$ длины элемента [48] и не превышает допустимый прогиб $\Delta h_{\text{доп}} = 8$ мм [138].
4. При изменении температурных режимов прогиб траверсы (в точке фиксации второго провода) составляет не более $h = 0,01725$ мм, что не влияет на соотношение $1/150$ (рисунок 3.18).

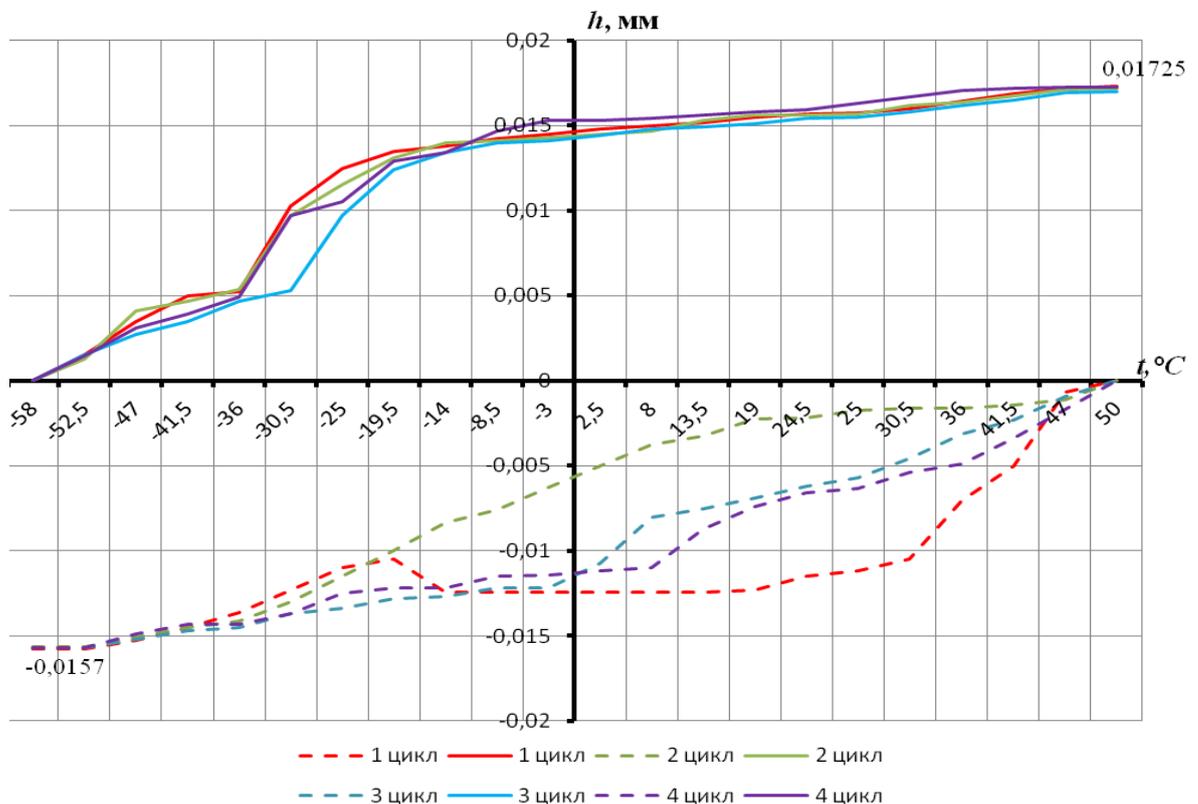


Рисунок 3.18 – График перемещения траверсы кронштейна в зоне фиксации второго провода, полученный при помощи «Spider 8»

В ходе определения поверхностных сопротивлений и емкости элементов кронштейна (см. рисунок 3.16) при изменении диапазона температур получены следующие результаты:

1. При изменении температур изменение поверхностной емкости не значительное, однако при минусовой температуре поверхностная емкость меньше, чем при плюсовой температуре (рисунок 3.19).

2. При изменении температур поверхностное сопротивление полимерного кронштейна изменяется незначительно, однако при минусовой температуре поверхностное сопротивление больше, чем при плюсовой температуре (рисунок 3.20).

3. Изменение температуры не влияет на электрическую прочность полимерного кронштейна.

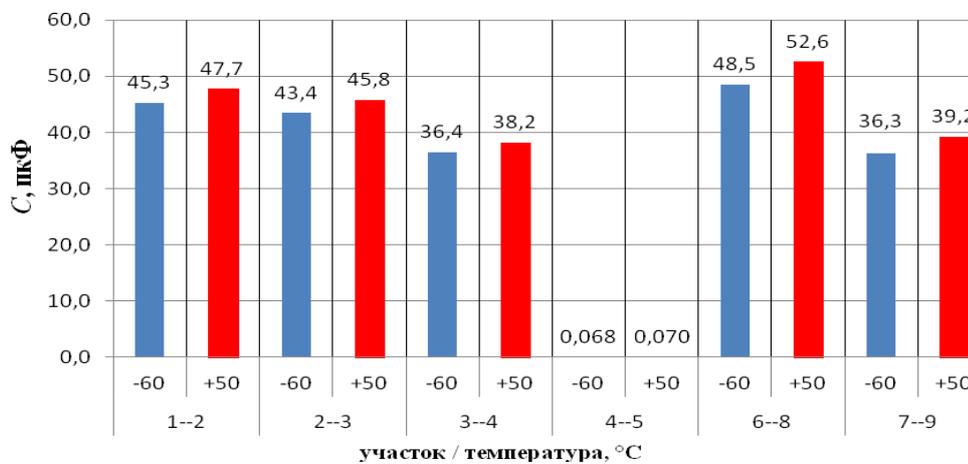


Рисунок 3.19 – Диаграмма зависимости поверхностной емкости элементов кронштейна при изменении температуры

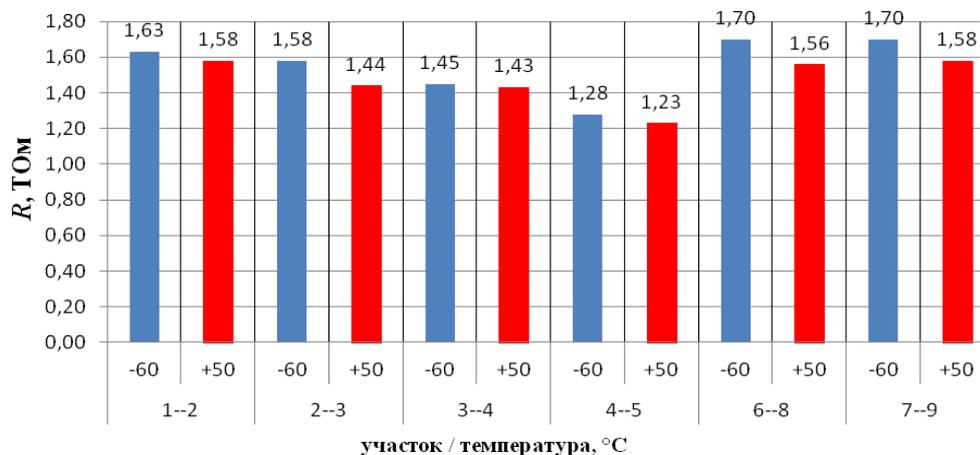


Рисунок 3.20 – Диаграмма зависимости поверхностного сопротивления элементов кронштейна при изменении температуры

По завершению четвертого цикла термомеханических испытаний в течение 24 ч., кронштейн был испытан кратковременным напряжением в сухом состоянии согласно п.5.15 [139].

В процессе электрических испытаний кратковременным напряжением в сухом состоянии полимерный кронштейн должен обеспечить электрическую прочность и в соответствии с [139, 109] не допустить появления следующих дефектов: трещин, местной эрозии, науглероженных побегов общей длиной 10 см и пробоя изоляционной части. Электрические испытания кратковременным напряжением в сухом состоянии полимерного кронштейна проводились для двух участков: 1 – фаза-земля; 2 – между фазами. В лаборатории техники высоких напряжений (ТВН) УрГУПС, в испытательной ячейке аппарата АИД-70, установлен объект испытаний (рисунок 3.21, а). Оконцеватели, предназначенные для крепления кронштейна к опоре, траверсы и 2-х тяг – заземлили, а узлы фиксации проводов соединили проводником друг с другом, создавая один потенциал на зажимах. В ходе испытания в соответствии с [109] подавалось переменное напряжение 40 кВ (фаза-земля), которое выдерживалось в течение 5 минут согласно п. 7.4.2.2 [110] (рисунок 3.21, б).

а)



б)

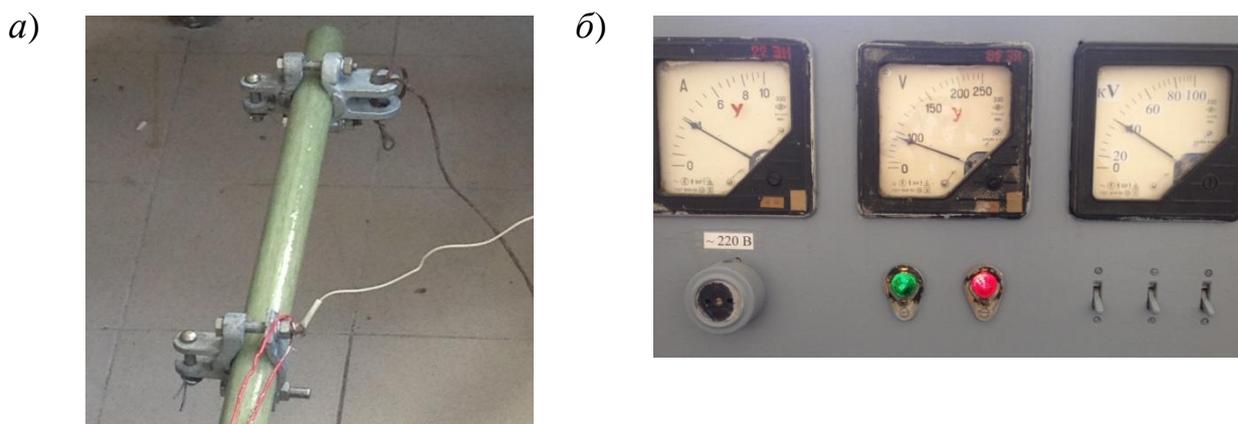


а) – рабочая зона проведения испытания кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью;

б) – показания измерительных приборов

Рисунок 3.21 – Фрагмент испытаний кратковременным фазным напряжением

Дальний (от оконцевателя траверсы) узел фиксации провода (отсоединив тягу) соединили с заземлением, а на центральный узел фиксации провода подали напряжение (рисунок 3.22, а). В ходе испытания (между фазами) подавалось переменное напряжение 40 кВ в соответствии с [109], которое выдерживалось на испытуемом образце в течение 5 минут согласно п. 7.4.2.2 [110] (рисунок 3.22, б).



- а) – рабочая зона проведения испытания кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазами;
 б) – показания измерительных приборов

Рисунок 3.22 – Фрагмент испытаний кратковременным напряжением между фазами

В ходе испытаний полимерного кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью, а также между фазами получены следующие результаты:

- пробой не зафиксирован;
- искр, треков не наблюдалось.

Электрические испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом проводились, согласно [109, 110, 139], в испытательной ячейке генератора импульсных напряжений (ГИН) лаборатории ТВН УрГУПС.

Кронштейн установили на заземленной станине таким образом, чтобы узлы фиксации проводов находились под одним потенциалом, оконцеватели траверсы и короткой тяги соединили между собой и соединили с «иглой» испытательной установки.

В ходе испытания подавалось переменное импульсное напряжение, величина которого составила $U = 180$ кВ, длительность импульса составила $\tau = 0,15$ мкс. На рисунке 3.23 представлен фрагмент испытания импульсным напряжением с крутым фронтом при помощи ГИН с фиксацией разряда.

В ходе испытания кронштейна импульсным напряжением с крутым фронтом получены следующие результаты:

- пробой кронштейна не зафиксирован;
- искр, трещин на поверхности кронштейна не наблюдалось.



Рисунок 3.23 – Фрагмент испытания импульсным напряжением с фиксацией разряда

Результаты термомеханических испытаний оформлены протоколом (ПРИЛОЖЕНИЕ Е).

Заключение комиссии. Кронштейн КПСИП-3 выдержал термомеханические испытания и может быть рекомендован к опытной эксплуатации на объектах ОАО «РЖД».

3.5 Оценка опытной эксплуатации полимерного кронштейна в воздушной ЛЭП продольного электроснабжения

На основании проведенных теоретических и практических исследований полимерный кронштейн КПСИП-3 в защитной оболочке Виксинт ПК-68 рекомендован к опытной эксплуатации.

Решением службы электрификации и электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» (ПРИЛОЖЕНИЕ Ж) установлен полимерный кронштейн КПСИП-3.

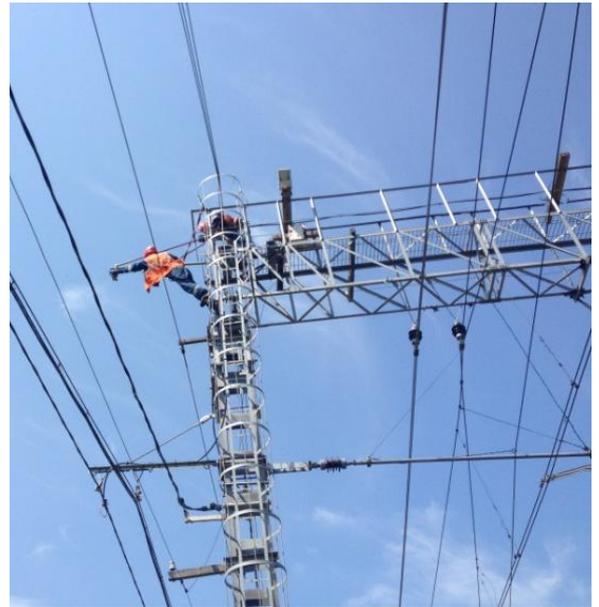
Опытный образец кронштейна смонтирован 22.06. 2015 г. на опоре № 80 ЛЭП – 6 кВ продольного электроснабжения с проводами СИП-3×50 станции Шувакиш участка Свердловской дистанции электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД». На рисунке 3.24 представлены фрагменты монтажа кронштейна.

Практическое использование научных результатов диссертационной работы оформлено актом внедрения и соответствующей справкой (ПРИЛОЖЕНИЯ И, К).

а)



б)



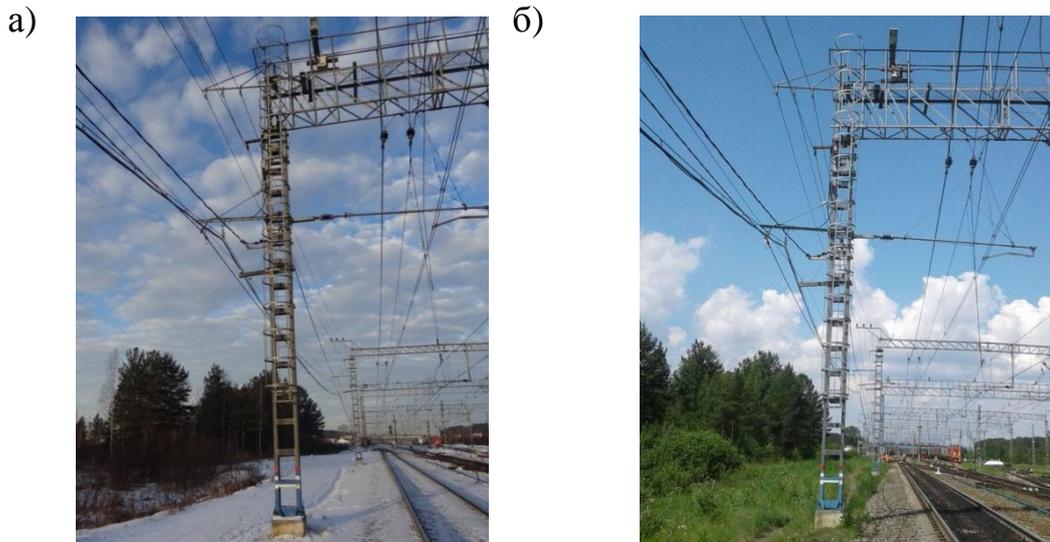
в)



а) – подъем кронштейна; б) – монтаж проводов на кронштейн;
в) – кронштейн КПСИП-3 в рабочем положении

Рисунок 3.24 – Монтаж кронштейна КПСИП-3 для опытной эксплуатации

Контрольные проверки состояния произведены 27.07.2015, 30.11.2015, 21.03.2016 и 22.06.2016 гг. При внешнем осмотре дефектов и нарушений работоспособности не выявлено (рисунок 3.25). Результаты контрольных проверок оформлены четырьмя актами (ПРИЛОЖЕНИЕ Л).



а) – осмотр 30.11.2015 г.; б) – осмотр 22.06.2016 г.

Рисунок 3.25 – Внешний осмотр кронштейна КПСИП-3 в опытной эксплуатации

Выводы по третьей главе

1. На основании проведенных теоретических исследований научно-исследовательским институтом транспортного строительства ОАО «ЦНИИС» разработана рабочая документация РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов», в которой представлен кронштейн для самонесущих изолированных проводов с двумя тягами – КПСИП-3. Критерии оценки качества изготовления, методов испытаний, приемки и эксплуатации определены в соответствии с разработанными техническими условиями «Кронштейны из полимерных материалов для контактной сети железных дорог».

2. Разработаны программы проведения экспериментальных исследований полимерного кронштейна. На основании протоколов испытаний комиссиями сде-

ланы заключения: полимерный кронштейн с двумя тягами выдержал механические испытания; изоляционные свойства стеклопластика СПП-ЭИ(Н) соответствуют норме; кронштейн КПСИП-3 без защитной оболочки соответствует требованиям ГОСТ 10390-82 и ПУЭ-7 и может применяться в 1 и 2 зонах со степенью загрязнения до 20 мкСм. Полимерный кронштейн в защитной оболочке Виксинт ПК-68 соответствует требованиям ГОСТ 10390-82 и ПУЭ-7 и может применяться с 1 по 4 зонах загрязнения; незначительное повреждение защитной оболочки не оказывает влияния на изоляционные свойства конструкции; КПСИП-3 выдержал термомеханические испытания и соответствует требованиям ГОСТ 28856, ГОСТ 1616.2. Полимерный кронштейн КПСИП-3 по результатам теоретических исследований и практических испытаний рекомендован к опытной эксплуатации. Опытный образец кронштейна смонтирован 22.06. 2015 г. на ЛЭП – 6 кВ продольного электроснабжения станции Шувакиш участка Свердловской дистанции электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».

4 ТЕХНИКО-ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ КРОНШТЕЙНОВ В ВОЗДУШНОЙ ЛЭП 6–10 кВ ЭЛЕКТРИФИЦИРОВАННЫХ ЖЕЛЕЗНЫХ ДОРОГ

4.1 Основные положения технико-экономического обоснования применения полимерного кронштейна

В соответствии с постановлением Правительства РФ от 15.05.14 № 445 «О внесении изменений в федеральную целевую программу «Развитие транспортной системы России (2010-2020 годы)» [148] значительная часть бюджетных средств в период до 2020 г. будет направлена на снижение отказов и повышение надежности всех объектов железнодорожной инфраструктуры. По статистическим данным Управления электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», количество отказов поддерживающих конструкций (кронштейнов и изоляторов) ВЛ 6–10 кВ составляет около 10 % от общего числа нарушений электроснабжения устройств СЦБ. Сократить стоимость жизненного цикла поддерживающих конструкций при условии обеспечения высокого уровня надежности и требуемого уровня безопасности перевозочного процесса возможно за счет применения стеклопластика в качестве материала для изготовления кронштейнов воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ [99].

Для технико-экономического обоснования применения полимерного кронштейна проводов рассчитаны за 10-летний период сравнительные строительно-эксплуатационные затраты на металлические кронштейны, представленные на рисунке 1.3, и на полимерный кронштейн КПСИП-3 (ПРИЛОЖЕНИЕ Б, лист 3), с

целью выбора экономически эффективного варианта, исходя из минимума приведенных затрат.

Расчет произведен на 1 км воздушной линии при средней длине пролета 60 м, следовательно для 15 кронштейнов.

На первом этапе определены капитальные затраты по формуле

$$K = M + T + Z_{\text{пл}} + O_{\text{с.н}}, \quad (4.1)$$

где M – затраты на материалы, руб.;

T – затраты на топливо, руб.;

$Z_{\text{пл}}$ – затраты труда на монтаж кронштейнов 1 км ВЛ, руб.;

$O_{\text{с.н}}$ – отчисления на социальные нужды (30,4 % от фонда оплаты труда), руб.

Затраты на материалы с учетом всех элементов поддерживающей конструкции (изоляторов, вязок проводов, арматуры и т. д.) представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Затраты на материалы

Тип кронштейна	Цена, руб.	Арматура, руб.	Бугель большой, руб.	Бугель малый, руб.	Скоба, руб.	Цена изолятора, руб.	Цена вязки, руб.	Цинкование, руб.	Цена конструкции, руб.	Кол-во на 1 км, шт.	Стоимость на 1 км, руб.
КВЛЦ-50	4648	0	334	418	160	2340	0	15255	23155	15	347325,0
СИП-3п	4094	0	335	418	160	2340	0	12906	20253	15	303795,0
СИП-3	5180	0	0	0	160	348,57	300	13851	19839,57	15	297593,6
М2	8637	0	0	0	0	348,57	300	19818	29103,57	15	436553,6
КПСИП-3	2623	2383	0	0	0	0	0	78	5084	15	76260,0

Затраты на топливо связаны с доставкой оборудования и персонала к месту выполнения работ. Так как кронштейны имеют разную массу (таблица 4.2), необходимо использовать транспортные средства различной грузоподъемности: для металлических кронштейнов – ГАЗ-66 с расходом топлива 32 л на 100 км, для полимерного кронштейна – УАЗ-452/УАЗ-3742 с расходом топлива 15,4 л на 100 км.

Таблица 4.2 – Масса кронштейнов

Тип кронштейна	Масса кронштейна, кг	Масса и количество изоляторов, кг×шт.	Наличие вязки, кг×шт.	Общая масса, кг	Количество на 1 км, шт.	Общая масса на 1 км, кг
КВЛЦ-50	35,5	3,5×6	–	56,5	15	847,5
СИП-3п	26,8	3,5×6	–	47,8	15	717
СИП-3	39,3	3,5×3	0,5×3	51,3	15	769,5
М2	61,4	3,5×3	0,5×3	73,4	15	1101
КПСИП-3	28,56	–	–	28,56	15	428,4

Далее по методике, представленной в [149], произведен расчет зарплаты работников, занятых на выполнении монтажа по креплению кронштейнов проводов, с учетом выплат компенсационного и стимулирующего характера, а также отчислений на социальные нужды.

Суммарные капитальные затраты на установку кронштейнов приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Капитальные затраты на установку кронштейнов проводов

Тип кронштейна	Стоимость кронштейна, руб.	Топливо, руб.	Заработная плата, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Суммарные затраты, руб.
КВЛЦ-50	347325	1040,0	6224,1	1892,12	356481,21
СИП-3П	303795	1040,0	6224,1	1892,12	312951,21
СИП-3	297593	1040,0	6224,1	1892,12	306749,81
М2	436553	1040,0	9436,5	2868,71	449898,84
КПСИП-3	76260	500,5	5621,7	1709,02	84091,28

Как видно из таблицы 4.1, наибольшие затраты приходятся на долю металлических кронштейнов, особенно на М-2, а наименьшие соответствует кронштейну типа КПСИП-3.

К эксплуатационным расходам отнесены затраты труда, связанные с текущим содержанием и ремонтом кронштейнов, отчисления на социальные нужды, амортизационные отчисления.

Затраты на оплату труда при определенном виде технических работ (техническое обслуживание № 1, № 2, № 3, технический ремонт) определены с учетом

периодичности обслуживания поддерживающих конструкций ВЛ СЦБ и ПЭ, состава бригады и норм времени [150].

Амортизационные отчисления представляют собой накопления, предназначенные для замены оборудования по истечении срока его службы. Они зависят от стоимости объектов основных средств и срока эксплуатации и включаются в затраты предприятия.

Суммарная величина годовых эксплуатационных расходов приведена в таблице 4.4.

Таблица 4.4 – Эксплуатационные расходы на обслуживание кронштейнов проводов

Тип кронштейна	Зарботная плата, руб.	Отчисления на социальные нужды, руб.	Амортизационные отчисления, руб.	Суммарные эксплуатационные расходы, руб.
КВЛЦ-50	10663,25	3241,6	11577,5	25482,4
СИП-3п	10663,25	3241,6	10126,5	24031,4
СИП-3	8231,86	2502,5	8502,7	19237,0
М2	8231,86	2502,5	12473,0	23207,3
КПСИП-3	6046,29	1838,1	1906,5	9790,9

Согласно данным таблицы 4.4, наименьшая величина годовых эксплуатационных расходов приходится на полимерный кронштейн КПСИП-3 – 9791 руб. в расчете на 1 км линии. Причем наибольшую долю в структуре затрат занимает заработная плата с отчислениями на социальные нужды – 80,5 %.

Так как сравниваемые варианты отличаются только размерами потребных инвестиций и эксплуатационными расходами, то наиболее эффективное решение будет отвечать минимуму приведенных затрат [151]:

$$Z_{\text{пр}} = \sum_{t=0}^T \frac{K_t}{(1+E)^t} + (1-\gamma) \sum_{t=0}^T \frac{C_t}{(1+E)^t}, \quad (4.2)$$

где T – горизонт расчета;

- t – шаг расчета;
- K_t – капитальные затраты периода t ;
- E – норма дисконта ($E = 0,1$);
- γ – доля налоговых отчислений в приросте прибавочного продукта ($\gamma = 0,2$);
- C_t – эксплуатационные затраты периода t .

На рисунке 4.1 представлены результаты расчета приведенных строительно-эксплуатационных затрат по вариантам за период $T = 10$ лет.

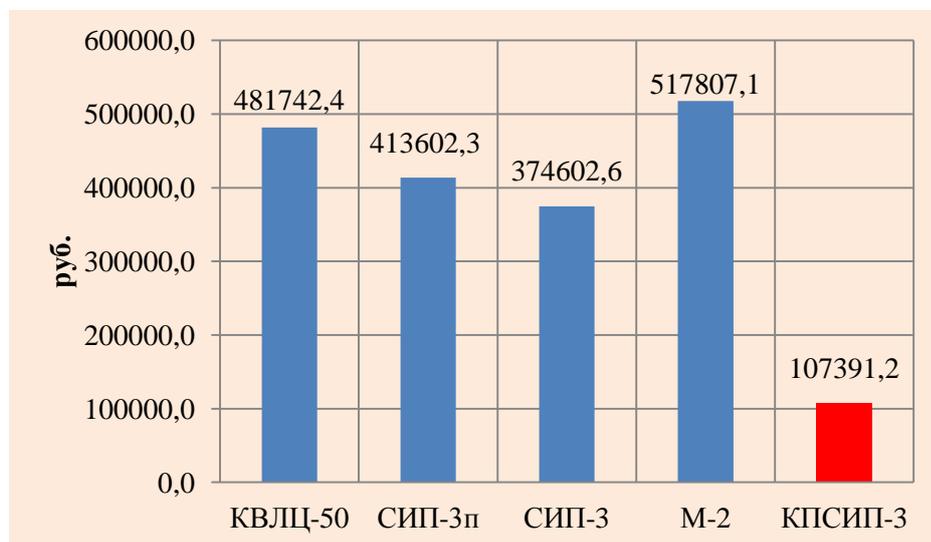


Рисунок 4.1 – Приведенные строительно-эксплуатационные затраты по типам кронштейнов

На последнем этапе произведена оценка экономического эффекта при внедрении и эксплуатации кронштейна, выполненного из композитного материала, за период 10 лет (рисунок 4.2).

Выполненное технико-экономическое сравнение [152] показало, что полимерный кронштейн проводов характеризуется минимумом приведенных затрат, т. е. обладает наибольшим экономическим эффектом, чем металлические аналоги. Следовательно, он является перспективным для применения при капитальном ремонте и строительстве новых воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

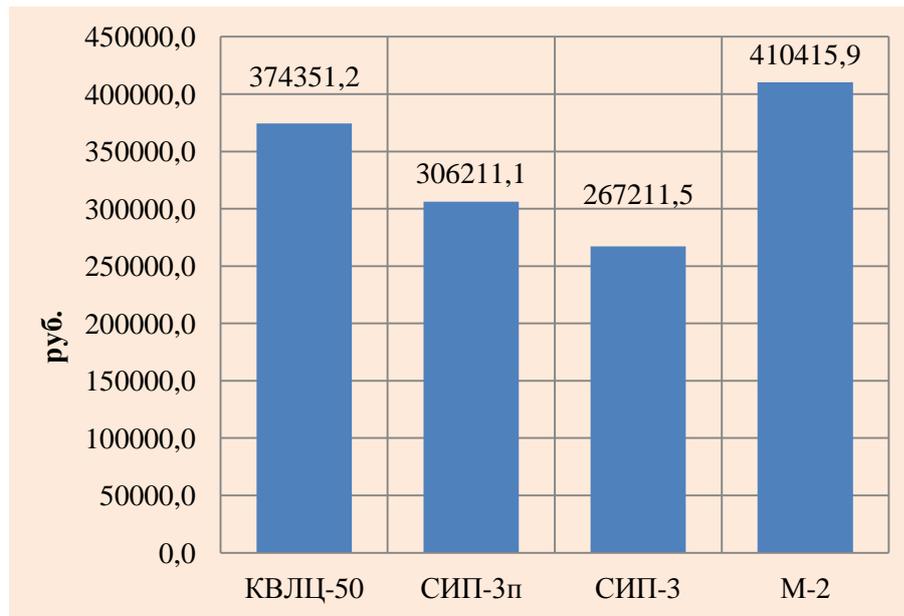


Рисунок 4.2 – Экономический эффект от внедрения полимерного кронштейна

4.2 Требования к безопасности

Полимерные кронштейны по РД № 3320 возможно применять на участках постоянного и переменного тока электрифицированных железных дорог. В соответствии с [105] в 1–4 ветровых районах, в 1–4 районах по толщине стенки гололеда, в 1–4 районах по снеговым нагрузкам согласно районированию по [153]. В средах по степени агрессивного воздействия на металлические конструкции – слабо-, средне-, сильноагрессивной согласно [154]. При расчетной температуре (средняя температура наиболее холодной пятидневки обеспеченностью 0,92) по [155] до минус 65 °С.

Для обеспечения бесперебойной работы полимерного кронштейна в процессе эксплуатации необходимо соблюдать требования [44], выполнять технические мероприятия в срок с соблюдением технологического процесса.

Долговечность кронштейна достигается нанесением на поверхность металлических деталей защитного антикоррозионного покрытия методом горячего цинкования по [49], а также нанесением на поверхность изделий с резьбой защитного антикоррозионного покрытия методом термодиффузионного цинкования в соответствии с [156].

При изготовлении, погрузке, транспортировании, разгрузке и монтаже кронштейнов следует соблюдать требования действующих нормативных документов по технике безопасности в соответствии с [157].

Кронштейны должны обеспечивать безопасность в эксплуатации при выполнении [158].

Выводы по четвертой главе

1. Выполненное технико-экономическое сравнение показало, что полимерный кронштейн характеризуется минимумом приведенных затрат, т. е. обладает наибольшим экономическим эффектом, чем металлические аналоги. Следовательно, он является перспективным для применения при капитальном ремонте и строительстве новых воздушных ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ.

2. При выполнении технических мероприятий в срок с соблюдением технологического процесса будут обеспечены бесперебойная работа и длительный срок службы полимерного кронштейна.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенные исследования позволили сделать следующие выводы:

1. Выявлены наиболее слабые по прочности элементы существующих поддерживающих конструкций воздушной ЛЭП устройств СЦБ и ПЭ. Определены основные факторы, из-за которых происходят отказы кронштейнов и изоляторов.

2. Определено, что стеклопластик профильный электроизоляционный СПП-ЭИ(Н) может быть использован для изготовления поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Сформулированы основные требования, которым должны отвечать полимерные кронштейны воздушных ЛЭП 6–10 кВ.

3. Разработана методика расчета механической прочности полимерного кронштейна, определены геометрические размеры (диаметры траверсы и тяг, фазное и межфазные расстояния, точки крепления тяг к траверсе) позволяющие обеспечить механическую прочность полимерного кронштейна при изменении статических и динамических нагрузок.

4. Определены направления анализа электрической прочности полимерного кронштейна, проведено математическим моделированием гладкостержневого изолятора по определению 50 %-ного разрядного напряжения в зависимости от степени загрязнения для полимерного кронштейна, получены численные значения удельной поверхностной проводимости, дана вероятностная оценка работоспособности полимерного кронштейна в различных районах степени загрязнения, определена вероятность перекрытия линейной изоляции разрядом молнии, доказано, что полимерный кронштейн может быть использован в 1 и 2 зонах степени загрязнения при напряжении 10 кВ, в 1 и 4 зонах СЗ для ВЛ 6кВ.

5. Выполнена и утверждена рабочая документация РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов».

6. Разработаны программы проведения экспериментальных исследований полимерного кронштейна. На основании протоколов испытаний: полимерный кронштейн КПСИП-3 выдержал механические, электрические, термомеханические испытания и рекомендован к опытной эксплуатации. Опытный образец кронштейна смонтирован 22.06.2015 г. на ЛЭП–6 кВ продольного электроснабжения действующей системы электроснабжения.

7. На основании проведенного технико-экономического расчета, определено, что при строительстве новых и модернизации существующих воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ полимерный кронштейн КПСИП-3 является перспективным для применения, так как имеет минимум приведенных строительно-эксплуатационных затрат.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция формирования хозяйственного комплекса и системы управления Дирекции капитального ремонта и реконструкции объектов электрификации и электроснабжения – филиала ОАО «РЖД». – М., 2011. – 91 с.

2. Стратегия инновационного развития ОАО «Российские железные дороги» на период до 2015 г. («Белая книга» ОАО «РЖД»). – М., 2010. – 77 с.

3. Постановление Правительства РФ от 15 мая 2014 г. №445 «О внесении изменений в федеральную целевую программу «Развитие транспортной системы России (2010–2020 годы)». – М., 2014. – 567 с.

4. Правила технической эксплуатации железных дорог Российской Федерации : утв. Приказом Минтранса РФ от 21.12.2010, № 286, в ред. приказов Минтранса России от 04.06.2012 №162, от 13.06.2012 №164. – Екатеринбург : ИД «Урал ЮР Издат», 2013. – 240 с.

5. Кочунов, Ю. А. Провода и поддерживающие конструкции линий продольного электроснабжения : учеб.-метод, указания / Ю. А. Кочунов, А. О. Грехов. – Екатеринбург : УрГУПС, 2013 – 54 с.

6. Марквардт, К. Г. Контактная сеть : учеб. для вузов ж.-д. трансп. / К. Г. Марквардт, И. И. Власов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1977.–271 с.

7. Ожегов, С. И. Словарь русского языка: Ок. 57000 слов. / под ред.чл.-кор. АН СССР Н. Ю.Шведовой. – 20-е изд., стереотип. – М. : Рус. яз., 1989. – 750 с.

8. Электроснабжение нетяговых потребителей железнодорожного транспорта. Устройство, обслуживание, ремонт : учеб. пособие. / под ред. В. М. Долдина. – 2-е изд., стер. изд. – М. : ФГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2011 – 304 с.

9. Марквардт, К. Г. Электроснабжение электрифицированных железных дорог / К. Г. Марквардт. – М. : Транспорт, 1982. –524 с.

10. Контактные сети и линии электропередачи / В. П. Михеев – М. : Маршрут, 2003. – 416 с.
11. Фрайфельд, А. В. Проектирование контактной сети / А. В. Фрайфельд. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Транспорт, 1984 – 327 с.
12. Контактная сеть и воздушные линии. Нормативно-методическая документация по эксплуатации контактной сети и высоковольтных воздушных линий : справочник / Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М. : «ТРАНСИЗДАТ», 2001. – 512 с.
13. Изделия контактной сети электрифицированных железных дорог : каталог [Электронный ресурс] / ОАО «Люберецкий электромеханический завод» – Московская область, г. Люберцы, ст. Люберцы-II МЖД. – М., 2006. – 88 с. – URL: <http://www.tdlemz.ru>.
14. Каталог чертежей и технического описания изготавливаемой продукции ЗАО «ФОРАТЕК ЭнергоТрансСтрой» [Электронный ресурс]. – М., 2004. – 96 с. – URL: <http://www.foratec-energo.com>.
15. Типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Серия 7.501-1. Контактная сеть электрифицированных железных дорог и воздушные линии на опорах контактной сети. Вып. 15. Подвеска проводов ВЛ-10кВ, ДПР и низковольтных линий на опорах контактной сети. Рабочие чертежи. – М. : Трансэлектропроект, 1988. – 111 с.
16. Узлы контактной подвески КС-200 постоянного тока. Альбом КС 307.000.000. Кронштейны проводов различного назначения. – М. : Трансэлектропроект, 1999. – 38 с.
17. Отраслевые типовые строительные конструкции, изделия и узлы. Металлические кронштейны ВЛ 6-10кВ на опорах контактной сети. Рабочие чертежи. – М. : Трансэлектропроект, 1995. – 21 с.
18. Типовые узлы и детали контактной сети электрических железных дорог. 4.501-25. Унифицированные поддерживающие конструкции для подвески прово-

дов на опорах контактной сети. Альбом 2. Изделия, изготавливаемые на месте строительства. – М. : Трансэлектропроект, 1975. – 61 с.

19. Узлы контактной подвески КС-200 постоянного тока. Альбом КС.400.000.000 К. Схемы размещения проводов различного назначения на опорах контактной сети. – М. : Трансэлектропроект, 1999. – 19 с.

20. Конструкции контактной сети с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования. Кронштейны СИП-1, СИП-2, СИП-3. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 6 с.

21. Конструкции контактной сети переменного тока с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования № 4971-6. Кронштейны системы питания 2х25 кВ. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 17 с.

22. Конструкции контактной сети переменного тока с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования. Кронштейны КФШЦ, КФЭДЦ, КФДПЦ. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 15 с.

23. Конструкции контактной сети постоянного тока с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования № 4971-4. Кронштейн СИП-3П. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 15 с.

24. Конструкции контактной сети переменного тока с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования. Кронштейны КФЦ-8, КФЦ-10, КФУЦ-8, КФУЦ-10. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 20 с.

25. Конструкции контактной сети постоянного тока с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования. Альбом 1. Кронштейны КВЛЦ-50, КВЛСЦ-50, КВЛЦ-63, КВЛСЦ-63. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 27 с.

26. Конструкции контактной сети постоянного тока с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования. Альбом 2. Кронштейны КФДЦ-50, КФДСЦ-50, КФДЦ-63, КФДСЦ-63, КФПЦ-63, КФДСЦ-63, КФПЦ-50, КФПУЦ-50, КФПУЦ-63. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 28 с.

27. ОТУ 32-4954-4. Конструкции контактной сети постоянного тока с антикоррозионным покрытием методом горячего цинкования. Кронштейн СИП-3П. – М. : Трансэлектропроект, 2000. – 15 с.
28. Каталог изделий контактной сети. – 2-е изд., испр. и доп. / ЗАО «Универсал – контактные сети» (УСК). – СПб., 2011. – 319 с.
29. Шергунова, Н. А. Повышение надежности воздушных линий электропередачи распределительных сетей / Н. А. Шергунова. – М. : Энергоатомиздат, 2006. – 212 с.
30. Григорьев, Ю. Е. Строительство и монтаж линий электропередачи / Ю. Е. Григорьев. – М.; Л. : Энергия, 1966. – 184 с.
31. Денисов, Ю. М. Электропроводность электросетевой древесины / Ю. М. Денисов, А. И. Сергеев, В. Н. Яковлев ; под общ. ред. проф. Ю. М. Денисова. – Самара : СамИИТ, 2001. – 147 с.
32. Яковлев, В. Н. Защита деревянных опор воздушных линий / В. Н. Яковлев, Ю. А. Варфоломеев. – Ташкент : Фан, 1992. – 208 с.
33. СНиП II-25-80. Строительные нормы и правила. Нормы проектирования. Деревянные конструкции. – М. : Стройиздат, 1983. – 31 с.
34. Реконструкция и модернизация контактной сети и воздушных линий. Ч. I. Узлы и конструкции : учеб.-ил. пособие / под ред. В. М. Долдина. – М. : ГОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2008. – 132 с.
35. Крюков, К. П. Конструкции и механический расчет линий электропередачи / К. П. Крюкова, Б. П. Новгородцев. – 2-е изд., перераб. и доп. – Л. : Энергия, Ленингр. отд-ние, 1979. – 312 с.
36. Крюков, К. П. Конструкции и расчет металлических и железобетонных опор линий электропередачи / К. П. Крюков, А. И. Курсанов, Б. П. Новгородцев. – М. : Энергия, 1964. – 586 с.
37. Барг, И. Г. Воздушные линии электропередачи. Вопросы эксплуатации и надежности / И. Г. Барг, В. И. Эдельман. – М. : Энерго-атомиздат, 1985. – 248 с.

38. Устройства электрификации и продольного электроснабжения : спр.-метод. пособие / ВНИИ трансп. стр-ва ; под ред. Д. И. Федорова. – М. : Транспорт, 1982. – 263 с.
39. Ефимов, А. В. Надежность и диагностика систем электроснабжения железных дорог / А. В. Ефимов, А. Г. Галкин. – М. : УМК МПС России, 2000. – 512 с.
40. Шурыгин, В. П. Особенности проектирования и строительства устройств энергоснабжения в суровых климатических условиях / В. П. Шурыгин, А. Ф. Белов, В. Я. Кулага ; под ред. В. П. Шурыгина. – М. : Транспорт, 1977. – 79 с.
41. Герман, Л. А. Устройства и линии электроснабжения автоблокировки / Л. А. Герман, М. И. Векслер, И. А. Шелом. – М. : Транспорт, 1987. – 192 с.
42. Герман, Л. А. Электроснабжение автоблокировки и электрической централизации / Л. А. Герман, А. Л. Калинин. – М. : Транспорт, 1974. – 168 с.
43. Анастасиев, П. И. Защита линий электропередачи от коррозии в загрязненности атмосферы / П. И. Анастасьев, А. В. Коляда, Е. Г. Проектор. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1983. – 168 с.
44. Правила устройства и технической эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог. ЦЭ – 868. Департамент электрификации и электроснабжения. – М. : Трансиздат, 2002. – 184 с.
45. Инструкция по техническому обслуживанию и ремонту устройств электроснабжения сигнализации, централизации, блокировки и связи на федеральном железнодорожном транспорте (ЦЭ-881). Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М. : Трансиздат, 2002. – 40 с.
46. Указания по техническому обслуживанию и ремонту опорных конструкций контактной сети № К-146-2008. Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М., 2002. – 96 с.
47. Нормы по производству и приемке строительных и монтажных работ при электрификации железных дорог (устройства контактной сети). СТН ЦЭ 12–

00. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 2000. – 88 с.

48. Нормы проектирования контактной сети. СТН ЦЭ 141. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 2001. – 253 с.

49. ГОСТ Р 9.316-2006. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия термодиффузионные цинковые. Общие требования и методы контроля. – М. : Стандартинформ, 2006. – 12 с.

50. ГОСТ 9.402-2004. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия лакокрасочные. Подготовка металлических поверхностей перед окрашиванием. – М. : Стандартинформ, 2006. – 40 с.

51. ГОСТ 27744-2005. Изоляторы. Термины и определения. – М. : Госстандарт, 2005. – 14 с.

52. Правила устройства электроустановок (ПУЭ). – 7-е изд. – М. : Минэнерго, 2002. – 330 с.

53. Руцкий, В. М. Совершенствование методов проектирования и эксплуатации изоляции наружных электроустановок систем электроснабжения железных дорог : дис. ... д-ра техн. наук : 05.22.07 / Руцкий Владимир Михайлович. – Екатеринбург, 2004. – 373 с.

54. ГОСТ 1232-2005. Изоляторы линейные штыревые фарфоровые и стеклянные на напряжение 1–35 кВ. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2008. – 14 с.

55. ГОСТ 27661-2005. Изоляторы линейные подвесные тарельчатые. Типы, параметры и размеры. – М. : Стандартинформ, 2005. – 9 с.

56. ГОСТ 12670-99. Изоляторы фарфоровые тарельчатые для контактной сети электрифицированных железных дорог. Общие технические условия : Международный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – Минск, 1999. – 17 с.

57. Чайкина, Л. П. Техника высоких напряжений : учеб. для техникумов и колледжей ж.-д. транспорта / Л. П. Чайкина. – М. : Маршрут, 2005. – 229 с.

58. Анастасиев, П. И. Линии электропередачи до 10 кВ промышленных предприятий / П. И. Анастасиев, Ю. А. Фролов. – М. : Энергия, 1980. – 104 с.
59. Косяков, А. А. Диагностика и контроль состояния изоляции устройств электроснабжения железных дорог 6-10 кВ : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Косяков Алексей Александрович. – Екатеринбург, 2006. – 149 с.
60. Абрамов, В. Д. Эксплуатация изоляторов высокого напряжения / В. Д. Абрамов, М. В. Хомяков. – М. : Энергия, 1976. – 264 с.
61. Ковалев, А. О. Разработка и реализация концепции построения систем дистанционной диагностики транспортно-энергетических объектов : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.13.01 / Ковалев Алексей Олегович. – Рязань, 2005. – 20 с.
62. Плотников, Ю. И. Точность и достоверность контроля при тепловизионном диагностировании оборудования электрифицированных линий / Ю. И. Плотников // Железные дороги мира. – 2006. – № 03. – С. 50 – 54.
63. Плотников, Ю. И. Перспективы создания компьютеризированной системы диагностирования изоляторов контактной сети по ультрафиолетовому излучению / Ю. И. Плотников [и др.] // Железные дороги мира. – 2004. – № 07. – С. 50–53.
64. Хадсон, Р.Д. Инфракрасные системы / Р. Д.Хадсон ; пер. с англ.: Я. Б. Герчиков ; ред. пер. с англ. Н. В. Васильченко. – М. : Мир, 1972. – 534 с. : ил.
65. Цирель, Я. А. Применение инфракрасного излучения для проверки контактов и изоляторов / Я. А. Цирель, В. С. Поляков, Л. М. Блюдников // Электрические станции. – 1976. – № 1. – С. 51–53.
66. Куценко, С. М. Методы дистанционной диагностики высоковольтной изоляции контактной сети / С. М. Куценко, М. Э. Федоров // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. – 2014. – № 4 (44). – С. 107-110.
67. Василянский, А. М. Компьютеризированная тепловизионная система диагностирования арматуры контактной сети / А. М. Василянский, В. П. Герасимов, В. Ф. Грачев // Железные дороги мира. – 2003. – № 12. – С. 37 – 43.

68. Герасимов, В. П. Вагон-лаборатория нового поколения для испытаний контактной сети / В. П. Герасимов, А. В. Пешин, Ю. М. Федоришин, Н. А. Бондарев // Железные дороги мира. – 1998. – № 12. – С. 22 – 28.

69. Куценко, С. М. Разработка дистанционной диагностики линейной изоляции контактной сети железнодорожного транспорта : автореф. дис. ... канд. техн. наук : 05.14.12 / Куценко Сергей Михайлович. – Томск, 2006. – 23 с.

70. Базанов, В. П. Ультразвуковой метод контроля фарфоровой изоляции воздушных линий электропередачи 35 – 220 кВ / В. П. Базанов, М. В. Спирин, В. А. Тураев // Энергетик. – 2000. – № 4. – С. 16–17.

71. Сухопрудский, Н. Д. Методы профилактических испытаний изоляторов контактной сети без демонтажа // Труды ВНИИЖТ. – Вып. 48.– М. : Трансжелдориздат, 1958. – С. 45–69.

72. Радченко, В. Д. Перенапряжения и токи короткого замыкания в устройствах электрифицированных железных дорог постоянного тока / В. Д. Радченко, С. Д. Соколов, Н. Д. Сухопрудский. – М. : Трансжелдориздат, 1959. – 304 с.

73. Радченко, В. Д. Техника высоких напряжений устройств электрической тяги / В. Д. Радченко. – М. : Транспорт, 1975. – 360 с.

74. Сви, П. М. Контроль изоляции оборудования высокого напряжения / П. М. Сви – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергоатомиздат, 1988. – 128 с.

75. Каетанович, М. М. Изоляторы и арматура для воздушных линий электропередачи / М. М. Каетанович, С. В. Крылов, А. И. Цимберов. ; под общ. ред. М. М. Каетанович. – М. ; Л. : Энергия, 1965. – 200 с.

76. Харченко, А. Ф. Техника высоких напряжений. Изоляция устройств электроснабжения железных дорог: учеб. пособие. / А. Ф. харченко. – М. : ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2013. – 190 с.

77. Мерхалев, С. Д. Выбор и эксплуатация изоляции в районах с загрязненной атмосферой / С. Д. Мерхалев, Е. А. Соломоник. – Л. : Энергоатомиздат. Ленингр. отд-ние, 1983. – 120 с.

78. Исследования и разработка ресурсосберегающих технологий на железнодорожном транспорте : межвуз. сб. науч. тр. с междунар. участием / под ред. д-ра техн. наук В. Н. Яковлева. – Вып. 23. – Самара : СамИИТ, 2002. – 506 с.

79. Арбузов, Р. С. Обзор зарубежных методов УФ инспекции ВЛ. НСП «Электросетьсервиса» – филиала ОАО «ФСК ЕЭС» / Р. С. Арбузов, А. Г. Овсянников. – Новосибирск, 2006. – 8 с.

80. Технический каталог изоляторов для контактной сети и ВЛ электрифицированных железных дорог. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 2000. – 112 с.

81. Механизация работ в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог : метод. пособие по устройству, эксплуатации автомотрис, автодрезин, специальных машин, механизмов и средств малой механизации, применяемых в хозяйстве электрификации и электроснабжения железных дорог Российской Федерации. Департамент электрификации и электроснабжения ОАО «Российские железные дороги». – М. : Трансиздат, 2004. – 456 с.

82. РД 34.45-51.300-97. Объемы и нормы испытаний электрооборудования. 6-е изд.. – М. : НЦ ЭНАС, 2001. – 256 с.

83. Методы неразрушающего контроля изоляции [Электронный ресурс] / ЗАО «ПАНАТЕСТ» – URL: <http://www.panatest.ru>.

84. Замышляев, А. М. Прикладные информационные системы управления надежностью, безопасностью, рисками и ресурсами на железнодорожном транспорте / А. М. Замышляев. – Ульяновск : Областная типография «Печатный двор», 2013. – 143 с.

85. Митрофанов, С. А. Совершенствование системы диагностики и оценки состояния контактной сети электрифицированных железных дорог : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.07 / Митрофанов Семен Александрович. – Екатеринбург, 2011. – 236 с.

86. Анализ работы хозяйства электрификации и электроснабжения в 2014 году. Управление электрификации и электроснабжения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД», – М., 2014. – 112 с.

87. Кочунов, Ю. А. Анализ работы поддерживающих конструкций ВЛ 6-10 кВ / Ю. А. Кочунов, А. А. Ягодин, Р. А. Никифоров // Вестник УрГУПС. – 2016. – № 1 (29). – С. 123-131. – ISSN 2079-0392.

88. Прохоренко, В. П. *SolidWorks*. Практическое руководство / В. П. Прохоренко. – М.: ООО «Бином-Пресс», 2004. – 448 с. : ил.

89. Алямовский, А. А. Инженерные расчеты в *SolidWorks Simulation* / А. А. Алямовский. – М.: ДМК-Пресс, 2010. – 464 с.

90. Программа и методика испытаний на механическую прочность узлов и деталей контактной сети электрифицируемых дорог. – М. : ЦНИИС, 2004.

91. Инструкция по обеспечению надежности работы устройств электро-снабжения железных дорог в зимних условиях (ЦЭ-713). Департамент электрификации и электроснабжения Министерства путей сообщения Российской Федерации. – М. : Трансиздат, 1999. – 24 с

92. ГОСТ 535-2005. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия. – М. : Стандартинформ, 2007. – 27 с.

93. Кочунов, Ю. А. Контактная сеть будущего / Ю. А. Кочунов, А. О. Грехов // РСП Эксперт. – 2014. – №12(68). – С. 17–18. – ПИ № ФС77-48706.

94. Потапов, В. Д. Полимерные материалы в устройствах контактной сети / В. Д. Потапов [и др.]. – М. : Транспорт. – 1988. – 224 с.

95. Лукьянов, А. М. Разработка полимерных изолирующих конструкций, обеспечивающих повышение промышленной безопасности контактных электрических сетей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.04, 05.23.17 / Лукьянов Анатолий Михайлович. – М., 1998. – 225 с.

96. Нанотехнологии на железнодорожном транспорте : каталог [Электронный ресурс] / РОСНАНО «Железнодорожная отрасль», ОАО «РЖД». – М., 2013. – 32 с. – URL : <http://www.rusnano.com/infrastructure/solutions/sector/railway/>

97. Предварительный национальный стандарт. Консоли из полимерных материалов для контактной сети железных дорог. Методы испытаний. – М. : Стандартинформ, 2014. – 14 с.

98. Федотов, А. А. Деревянные кронштейны заменят полимерными / А. А. Федотов, С. А. Колесников, Р. А. Хорошевский // Локомотив. – 2013. – № 3 (675). – С. 43.

99. Кочунов, Ю. А. Применение композитных материалов для изготовления поддерживающих конструкций линий продольного электроснабжения / Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2014. – № 1 (40). – С. 76-80. – ISSN 1815-9400.

100. Аминев, Р. Н. Проект участка контактной сети постоянного тока с разработкой кронштейна проводов 6-10 кВ : дипломный проект. – Екатеринбург : УрГУПС, 2011. – 98 с.

101. Бахматов, А. В. Проект участка контактной сети постоянного тока с разработкой кронштейна для крепления самонесущего изолированного провода напряжением 6-10 кВ : дипломный проект. – Екатеринбург : УрГУПС, 2013. – 87с.

102. Испытательная камера Techno7010Wi. Руководство по эксплуатации.

103. Симонов, А. Ю. Программа «POLUS v.2.1.1» / А. Ю. Симонов, Гольдштейн Ю. Б. – Петрозаводск : Петрозаводский гос. ун-т, 2002.

104. ТУ 2296-009-37925603-2013. Стеклопластики профильные электроизоляционные / Технические условия: Свердловский изоляционный завод. – Екатеринбург, 2013. – 18 с.

105. ГОСТ 15150-2013. Машины, приборы и другие технические изделия. Исполнения для различных климатических районов. Категории, условия эксплуатации, хранения и транспортирования в части воздействия климатических факторов внешней среды. – М. : Стандартинформ, 2013. – 76 с.

106. ГОСТ Р 8.000-2015. Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования. Основные положения. – М. : Стандартиформ, 2015. – 10 с.

107. Аппарат испытания диэлектриков «АИД-70М». Руководство по эксплуатации. 2АМБ.169.005 РЭ [Электронный ресурс]. – URL: http://www.медрен-тех.рф/data/products/60/E5rukovodstvo_po_ekspluatatsii_apparataaid-70m.pdf.

108. Измеритель параметров электроустановок. MI 3102H CL EurotestXE 2,5 кВ. Руководство по эксплуатации. Версия 4.0, HW 4; Кодовый №. 20 751 850 [Электронный ресурс]. – URL: http://megommetr.ru/images/stories/METREL/3102H/mi_3102h_cl_eurotestxe_2_5_kv_eurotest_rus_hw4_ver_4.0_20_751_850.pdf.

109. ГОСТ Р 55189-2012. Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия. – М. : Стандартиформ, 2014. – 27 с.

110. ГОСТ 1516.2-2003. Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции. – М. : Издательство стандартов, 1998. – 35 с.

111. ГОСТ Р 55648-2013. Изоляторы для контактной сети железных дорог. Общие технические условия. – М. : Стандартиформ, 2014. – 24 с.

112. Пат. РФ №133360 на полезную модель, МПК Н 02 G 7/20. Устройство крепления проводов линии электропередачи к опоре / Аржанников Б. А., Аминев А. Н., Кочунов Ю.А.. – № 2013129108/07; заявл. 25.06.2013; опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 4 с. : ил.

113. СТ СЭВ 1199-78. Пластмассы. Методы испытания на растяжение. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1980. – 16 с.

114. ГОСТ 27380-87. Стеклопластики профильные электроизоляционные. Общие технические условия. – М. : Государственный комитет СССР по стандартам, 1987. – 31 с.

115. ГОСТ 4651-2014. Пластмассы. Методы испытания на сжатие. – М. : Стандартиформ, 2014. – 20 с.

116. ГОСТ 10390-2015. Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии. – М. : Стандартинформ, 2016. – 20 с.

117. ГОСТ Р52082-2003. Изоляторы полимерные опорные наружной установки на напряжение 6-220 кВ. Общие технические условия. – М. : Издательство стандартов, 2003. – 43 с.

118. СТО 56947007-29.120.90.033-2009. Траверсы изолирующие полимерные для опор ВЛ 110-220 кВ. Общие технические требования, правила приемки и методы испытаний. Департамент технологического развития и инноваций ОАО «ФСК ЕЭС». – М., 2010. – 30 с.

119. СТО 56947007-29.240.144-2013. Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии. Департамент технологического развития и инноваций ОАО «ФСК ЕЭС». – М., 2013. – 31 с.

120. РД 34.51.101-90. Инструкции по выбору изоляции электроустановок. – М. : Союзтехэнерго, 1990. – 55 с.

121. РД 34.51.503-93. Инструкция по эксплуатации электроустановок в районах с загрязненной атмосферой. Департамент науки и техники РАО «ЕЭС России». – М., 1994. – 42 с.

122. СТО 56947007-29.240.02.001-2008. Методические указания по защите распределительных электрических сетей напряжением 0,4-10 кВ от грозových перенапряжений. Департамент технологического развития и инноваций ОАО «ФСК ЕЭС». – М., 2004. – 52 с.

123. РД 153-34.3-35.125-99. Руководство по защите электрических сетей 6–1150 кВ от грозových и внутренних перенапряжений. – СПб.: ПЭИПК, 1999. – 227с

124. Туранов, Х.Т. Теоретическая механика в специальных задачах грузовых перевозок: учебное пособие / Х. Т. Туранов. – Новосибирск : Наука; Екатеринбург : Изд-во УрГУПС, 2012. – 448 с.

125. Беляев, Н. М. Сопротивление материалов / Н. М. Беляев. – М. : Наука, 1976. – 608 с.

126. Кочунов, Ю. А. Аналитическое определение прочности стеклопластикового кронштейна проводов для линий продольного электроснабжения / Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3 (43). – С. 102–108. – ISSN 1815-9400.

127. Туранов, Хабибулла. Прикладная механика железнодорожной техники в системе MathCAD : учеб. пособие для студентов вузов железнодорожного транспорта / Хабибулла Туранов. – Saarbrücken, Germany : Palmarium Academic Publishing, 2012. – 401 с.

128. Коркина, С. В. Источник загрязнения атмосферы и их влияние на работы изоляции контактной сети / С. В. Коркина [и др.] // Вестник СамГУ : Естественнонаучная серия. – 2004. – № 2 (32). – С. 137–144.

129. Кравченко, В. А. Проектирование и эксплуатация изоляции электроустановок в условиях загрязненной атмосферы / В. А. Кравченко, А. М. Ментюкова, В. Н. Яковлев. – Ташкент : Фан, 1993. – 204 с. : ил.

130. Тиходеев, Н. Н. Изоляция электрических сетей (методика выбора, статистической координации и приведение к норме) / Н. Н. Тихонов, С. С. Шур – Л. : Энергия, Ленинградское отделение, 1979. – 304 с. : ил.

131. СТ СЭВ 779-77. Системы электроснабжения, сети, источники, преобразователи и приемники электрической энергии. Номинальные напряжения свыше 1000 В. – М. : Издательство стандартов, 1978. – 3 с.

132. Александров, Г. Н. Электрическая прочность наружной высоковольтной изоляции / Г. Н. Александров, В. Л. Иванов, В. Е. Кизеветтер. – Л. : Энергия, 1969. – 239 с.

133. СП 226.1326000.2014. Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции. Официальное издание. – М. : Минрегион России, 2014. – 73 с.

134. Справочная система *Comsol Multiphysics 5.1* [Электронный ресурс] – URL: <https://www.comsol.ru/shared/downloads/IntroductionToCOMSOLMultiphysicsRU.pdf>.

135. Паранин, А. В. Совершенствование аэродинамических и тепловых расчетов проводов контактной сети : дис. ... канд. техн. таук : 05.22.07 / Паранин Александр Викторович. – Екатеринбург, 2010. – 192 с.

136. Нурмамедов, Т. А. Изучение условий работы линейной изоляции в районах с засоленными почвами / Т. А. Нурмамедов, Е. А. Соломоник // Изв. НИИПТ. – Сб. 15. – Л. : Энергия, 1969. – С. 102–124.

137. Пышкин, А. А. Определение поверхностной проводимости загрязненной изоляции / А. А. Пышкин, А. В. Паранин, Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2015. – № 4 (47). – С. 91–96. – ISSN 1815-9400.

138. РД-13-3320. Кронштейны из полимерных материалов. – М. : ОАО «ЦНИИС». 2013. – 82 с.

139. ТУ 5264-882-01393674-2015. Кронштейны из полимерных материалов для контактной сети железных дорог / Технические условия : ООО «НПП Электромаш». – Екатеринбург, 2016. – 23 с.

140. Динамометры общего назначения. [Электронный ресурс]. – URL: http://laborant.ru/netcat_files/528/350/h_1f0b46d5f88ee42945d7e69580c297ef.

141. ГОСТ 13837. Динамометры общего назначения. Технические условия. – М. : Стандартинформ, 1979. – 10 с.

142. Сухогузов, А.П. Электрические испытания полимерного кронштейна / А.П. Сухогузов, Н.Л. Иванов, Ю.А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2016. – №2 (49). – С. 119–122. – ISSN 1815-9400.

143. Аппарат испытания диэлектриков «АИД-70Ц». Руководство по эксплуатации. 2АМБ.169.005 РЭ. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.медрентех.рф/data/products/60/E5rukovodstvo_po_ekspluatatsii_apparata_aid-70ts.pdf.

144. ТУ 38.103508-81. Компаунды кремнийорганические типа Виксинт. Технические условия. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.klei-germetik.com.ua/index.php/germetiki/germetik-izol/kompaund-k-68>.

145. ТУ 38.303-04-05-90. Катализаторы холодного отверждения для кремнеорганических герметизирующих материалов. Технические условия. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.chemproduct.ru/files/katalizator-68.pdf>.

146. Измеритель параметров электроизоляции MIC 10k. Руководство по эксплуатации. Версия 1.01 [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.sonel.ru/common/files/manual/MIC-10k1-5050.pdf>.

147. Сухогузов, А. П. Термомеханические испытания полимерного кронштейна / А. П. Сухогузов, Н. Л. Иванов, Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2016. – №1 (48). – С. 93–96. – ISSN 1815-9400.

148. О внесении изменений в федеральную целевую программу «Развитие транспортной системы России (2010-2020 годы)» : постановление Правительства Российской Федерации от 15.05.14 № 445 [Электронный ресурс]. – URL: <http://base.garant.ru/70659782/>.

149. Положение о корпоративной системе оплаты труда работников филиалов и структурных подразделений ОАО «РЖД». Открытое акционерное общество «Российские железные дороги». – М., 2007. – 41 с.

150. Технологические карты на работы по содержанию и ремонту устройств контактной сети электрифицированных железных дорог. Кн. II. Техническое обслуживание и текущий ремонт. ЦЭ № 197-5/1-2. Департамент электрификации и электроснабжения МПС РФ. – М. : Трансиздат, 1999. – 311 с.

151. Волков, Б. А. Оценка экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте : учеб. пособие / Б. А. Волков. – М. : Транспорт, 2009. – 152 с.

152. Аржанников, Б. А. Технико-экономическое обоснование применения кронштейна ВЛ СЦБ и ПЭ, выполненного из композитного материала / Б. А. Аржанников, Н. А. Афанасьева, Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2015. – № 2 (45). – С. 92–95. – ISSN 1815-9400.

153. СП 20.13330.2011. Нагрузки и воздействия. Актуализированная редакция СНиП 2.01.07-85*. Официальное издание. – М. : Минрегион России, 2011. – 85 с.

154. СП 28.13330.2012. Защита строительных конструкций от коррозии. Актуализированная редакция СНиП 2.03.11-85*. Официальное издание. – М. : Минрегион России, 2011. – 99 с.

155. СП 131.13330.2012. Строительная климатология. Актуализированная редакция СНиП 23-01-99*. Официальное издание. – М. : Минрегион России, 2011. – 120 с.

156. ГОСТ Р 9.316. 2006. Единая система защиты от коррозии и старения. Покрытия диффузионные цинковые. Общие требования и методы контроля. – М. : Стандартинформ, 2006. – 12 с.

157. ГОСТ 12.0.00.1 – 2013. Система стандартов безопасности труда. Основные положения. – М. : Стандартинформ, 2015. – 7 с.

158. Правила безопасности при эксплуатации контактной сети и устройств электроснабжения автоблокировки железных дорог. ЦЭ-750. Департамент электрификации и электроснабжения. – М. : Трансиздат, 2010. – 160 с.

ПРОТОКОЛЫ
ИСПЫТАНИЯ ИЗОЛЯЦИИ

ЧЕЛЯБИНСКАЯ ДИСТАНЦИЯ
 ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
 Челябинского отделения ЮУЖД
 Предприятие СТАИАЛТА ОАО
 РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ
 Цех 454081 г. Челябинск, Ул. Мухоморова, 150а
 Телефон: 38-21-50
 Лицензия № _____ № _____
 от _____ № _____ 20 _____ г.

Форма ЭУ-70 0361831
 Утверждена ОАО «РЖД» в 2004 г.

22.04.2013г.

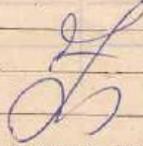
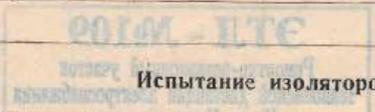
ПРОТОКОЛ № 01

Испытание изоляции в РУ 10 кВ

Траверса отоклопаяпластиковая

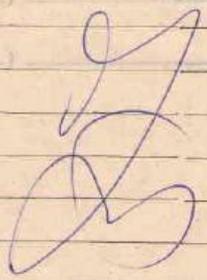
Испытание произведено напряжением ~ 40 кВ 50 Гц
 Время испытания 1 мин. Ток утечки не нормируется
 Испытано аппаратом типа АИД-70М погода ясно температура +20 °С

ЗАКЛЮЧЕНИЕ Целесообразно траверсу соответствующей
 конструкции. Испытание новопопавшими на напряжение
 в воздухе. Обнаружены дефекты. Рекомендуется
 вводить в эксплуатацию.

Испытание изоляторов высоковольтной измерительной штангой

При испытании опорных типа _____, натяжных типа _____ и подвесных
 типа _____ изоляторов РУ _____ кВ выявлены следующие изоляторы,
 не удовлетворяющие техническим нормам и подлежащие замене:



Все остальные изоляторы удовлетворяют техническим нормам.

Дорога **ЧЕЛЯБИНСКАЯ ДИСТАНЦИЯ**
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ
 Предприятие **Челябинское отделение ЮЖД**
 Цех **ЭЛЕКТРИКА ОАО**
 Лицензия № **РОССИЙСКИЕ ЖЕЛЕЗНЫЕ ДОРОГИ**
 от « 17 » 06 2013 г.

Форма ЭУ-70 0361831
 Утверждена ОАО «РЖД» в 2004 г.

17.06.2013

ПРОТОКОЛ № 02

Испытание изоляции в РУ 3,3 кВ

Траверса стеклопластиковая

Испытание произведено напряжением ~40 кВ 50Гц, количество расщепов = 10см.

Время испытания 1 мин. Ток утечки 0,4 мВ. А

Испытано аппаратом типа АИД-70М погода ясно температура +20 °C

ЗАКЛЮЧЕНИЕ Испытуемое устройство 100мм траверса
испытательное напряжение выдержало. Испытания
соответствует норме. Оборудование можно вводить
в работу.

Испытание изоляторов высоковольтной измерительной штангой

При испытании опорных типа _____, натяжных типа _____ и подвесных
 типа _____ изоляторов РУ _____ кВ выявлены следующие изоляторы,
 не удовлетворяющие техническим нормам и подлежащие замене:

Сопротивление изоляции траверсы стеклопластиковой,
на 100мм длины составляет:

$R_{из} = 6000 \text{ Ом}$.

Все остальные изоляторы удовлетворяют техническим нормам.

Обратная сторона протокола № 2

№ п/п	Наименование прибора	Тип	№ прибора	Класс точности	Дата проверки	Примечания
1	АИД-70М		2703	слр.	24.12.2013г.	
2	Мегомметр: MI 3102 SL		№ 1219103	слр.	22.10.2014	
П Р И Б О Р Ы						

Испытание производили Электромонтажники РРЧ / Курбанов А. Н.
Начальник лаборатории: Антонов Э. Г. / Федоскин А. В.
 Начальник подстанции _____



Кронштейны из полимерных материалов
Рабочая документация № 3320



НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ИНСТИТУТ
ТРАНСПОРТНОГО СТРОИТЕЛЬСТВА (ОАО ЦНИИС)

КРОНШТЕЙНЫ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ МАТЕРИАЛОВ

РАБОЧАЯ ДОКУМЕНТАЦИЯ

3320

СОГЛАСОВАНО:

Зам. Генерального директора

ООО «Научно-производственное предприятие «ЭЛЕКТРОМАШ»

М.Б. Аржанников

Зам. Генерального директора, главный инженер

А.А. Цернант

Зав. Отделением электрификации ж.д.

А.А. Прямицын

Главный инженер проекта

Р.А. Карякин



2013

Протокол № 1 от 24.03.2014 г. Результаты предварительных испытаний
кронштейнов полимерных по проекту № 3320

Открытое Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
транспортного строительства» (ЦНИИС)

Испытательный центр конструкций и узлов
устройств электроснабжения железнодорожного
транспорта
«ЦНИИС - ЭлЖТ»

129329, Москва, Кольская, 1
Тел.(499)180 2042 Факс(499)1897253
180 3597

Аттестат аккредитации
№ ССФЖТ RU.01ЖТ.12ЦЭ.00114

Joint Stock Company Transport Construction
Research Institute (TSNIIS)

Electrical railway transport of constructions
and elements test centre
«TSNIIS - EIGT»

Kolskaya St., 1, 129329, Moscow, Russia
Tel.(499) 180 2042 Fax.(499) 1897253
180 3597

Accredit Attestation
№ ССФЖТ RU.01ЖТ.12ЦЭ.00114



УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ИЦ «ЦНИИС-ЭлЖТ» ОАО ЦНИИС,
Зам. Генерального директора – главный инженер



А.А. Цернант

сентябрь

2014 г.

ПРОТОКОЛ № 1 от 24.03.2014г. результатов предварительных испытаний кронштейнов полимерных по проекту № 3320

Комиссия в составе:

председатель Прямицын А.А., зав. отделением ЭЛ ОАО ЦНИИС,

и члены комиссии Кочунов Ю.А., ассистент кафедры «Электроснаб-
жения транспорта», УрГУПС

Карякин Р.А., зав. лабораторией «Методов расчета
устройств ж.д. электроснабжения»
ОАО ЦНИИС,

Сердюк С.П., зав. лабораторией «Контактная сеть»
ОАО ЦНИИС,

провела предварительные испытания типопредставителей изделий
(табл. 1).

Таблица 1 – Типопредставители изделий

Название проекта	Наименование типопредставителя
№ 3320 «Кронштейны из полимерных материалов»	3320-1.0.0.00 Кронштейн СИП-3
	3320-2.0.0.00 Кронштейн СИП-1

Разработчик рабочей документации (РД) – ОАО ЦНИИС, ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ».

Изготовитель опытных образцов – ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ».

На испытания были представлены следующие материалы:

- рабочая документация (РД);
- опытные образцы кронштейнов – СИП-1 и СИП-3 по проекту № 3320.

В результате обследования и испытаний комиссия установила:

1. ПРОВЕРКА КОМПЛЕКТНОСТИ И ВНЕШНЕГО ВИДА

Все узлы укомплектованы в соответствии с РД. Качество деталей удовлетворительное. Толщина защитного покрытия металлических элементов изделий, измеренная с помощью толщиномера «Константа 5» в нескольких точках, составляет от 100 до 130 мкм.

2. ПРОВЕРКА РАЗМЕРОВ И СОПРЯГАЕМОСТИ

Основные размеры всех изделий соответствуют РД.

Сопрягаемость узлов друг с другом и на опоре – удовлетворительная.

3. ПРОВЕРКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Схемы приложения нагрузок к каждому узлу приведены на рисунках 1 и 2.

Величины нагрузок и схемы испытания для узлов приняты по программе и методике испытаний на механическую прочность узлов и деталей контактной сети электрифицируемых дорог ЦНИИС.

3.1 Кронштейн СИП-3.

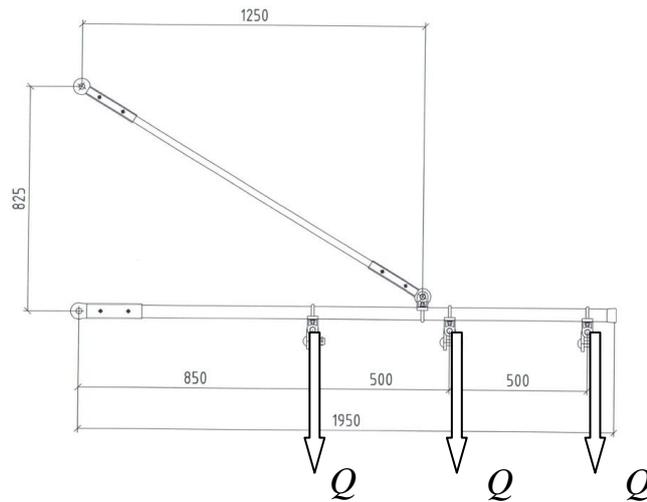


Рисунок 1 – Схема приложения нагрузок к кронштейну СИП-3

В таблице 2 приведены нагрузки испытаний кронштейна СИП-3.

Таблица 2 – Нагрузки при испытании

Тип кронштейна	Нагрузка, кН		Величины прогибов, мм	
	Допуск.	Испыт.	Допуск.	Испыт.
			<u>При нагр.</u> Остаточн.	<u>При нагр.</u> Остаточн.
СИП-3	1,7	2,5	-	-

При нагрузке $Q = 0,75$ кН прогиб составил 26 мм, что составляет 1/75 к длине кронштейна (при допустимом значении 1/150 (13мм) при испытательной нагрузке).

При нагрузке $Q = 1,00$ кН прогиб составил 35 мм, что составляет 1/56 к длине кронштейна (при допустимом значении 1/150 (13мм) при испытательной нагрузке).

3.2 Кронштейн СИП-1.

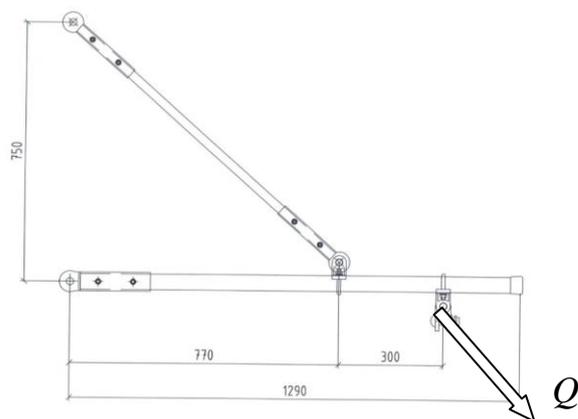


Рисунок 2 – Схема приложения нагрузок к кронштейну СИП-1

В таблицах 3 и 4 приведены основные и дополнительные нагрузки испытаний кронштейна СИП-1.

Таблица 3 – Нагрузки при испытании

Тип кронштейна	Нагрузка, кН		Величины прогибов, мм	
	Допуск.	Испыт.	Допуск.	Испыт.
			При нагр. Остаточн.	При нагр. Остаточн.
СИП-1	1,7	2,5	4/0	5,5/0

При нагрузке $Q= 1,7$ кН прогиб составил 4 мм, что составляет 1/322 к длине кронштейна (при допустимом значении 1/150 (8,6 мм) при испытательной нагрузке).

При нагрузке $Q= 2,5$ кН прогиб составил 5,5 мм, что составляет 1/235 к длине кронштейна (при допустимом значении 1/150 (8,6 мм) при испытательной нагрузке).

Таблица 4 – Дополнительные нагрузки при испытании

Тип кронштейна	Нагрузка, кН	Величины прогибов, мм
СИП-1	2,5	5,5
	4,5	11,8
	7,5	27,2
	9,5	смещение узла тяги в направление опоры

При указанных допускаемой и испытательной нагрузках деформаций узлов нет.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

4.1. Представленные ООО “НПП “ЭЛЕКТРОМАШ” на предварительные испытания изделия (табл.1) соответствуют требованиям нормативно-технической документации.

4.2. Кронштейн СИП-1(черт. 3320-2.0.0.00) выдержал механические испытания и может быть рекомендован к опытной эксплуатации на объектах ОАО «РЖД».

Председатель



Прямыцын А.А.

Члены комиссии



Кочунов Ю.А.



Карякин Р.А.



Сердюк С.П.

Протокол № 2 от 31.07.2014 г. Результаты предварительных испытаний
полимерного кронштейна СИП-3 по проекту № 3320

Открытое Акционерное общество
«Научно-исследовательский институт
транспортного строительства» (ЦНИИС)

Испытательный центр конструкций и узлов
устройств электроснабжения железнодорожного
транспорта
«ЦНИИС - ЭлЖТ»

129329, Москва, Кольская, 1
Тел.(499)180 2042 Факс(499)1897253
180 3597

Аттестат аккредитации
№ ССФЖТ RU.01ЖТ.12ЦЭ.00114



Joint Stock Company Transport Construction
Research Institute (TSNIIS)

Electrical railway transport of constructions
and elements test centre
«TSNIIS - EIGT»

Kolskaya St., 1, 129329, Moscow, Russia
Tel.(499) 180 2042 Fax.(499) 1897253
180 3597

Accredit Attestation
№ ССФЖТ RU.01ЖТ.12ЦЭ.00114

УТВЕРЖДАЮ

Руководитель ИЦ «ЦНИИС-ЭлЖТ» ОАО ЦНИИС,
Зам. Генерального директора – главный инженер



А.А. Цернант

« 24 » сентября 2014 г.

ПРОТОКОЛ № 2 от 31.07.2014г. результатов предварительных испытаний полимерного кронштейна СИП-3 по проекту № 3320

Комиссия в составе:

председатель Прямицын А.А., зав. отделением ЭЛ ОАО ЦНИИС,

и члены комиссии Кочунов Ю.А., старший преподаватель кафедры
«Электроснабжения транспорта»,
УрГУПС

Карякин Р.А., зав. лабораторией «Методов расчета
устройств ж.д. электроснабжения»
ОАО ЦНИИС,

Сердюк С.П., зав. лабораторией «Контактная сеть»
ОАО ЦНИИС,

провела предварительные испытания кронштейна СИП-3 (черт. 3320-1.0.0.00) по проекту № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов».

Разработчик рабочей документации (РД) – ОАО ЦНИИС, ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ».

Изготовитель опытных образцов – ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ».

На испытания были представлены следующие материалы:

- рабочая документация (РД);
- опытный образец кронштейна СИП-3 по проекту № 3320.

В результате обследования и испытаний комиссия установила:

1. ПРОВЕРКА КОМПЛЕКТНОСТИ И ВНЕШНЕГО ВИДА

Все узлы укомплектованы в соответствии с РД. Качество деталей удовлетворительное. Толщина защитного покрытия металлических элементов изделий, измеренная с помощью толщиномера «Константа 5» в нескольких точках, составляет от 100 до 130 мкм.

2. ПРОВЕРКА РАЗМЕРОВ И СОПРЯГАЕМОСТИ

Основные размеры всех изделий соответствуют РД.

Сопрягаемость узлов друг с другом и на опоре – удовлетворительная.

3. ПРОВЕРКА МЕХАНИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ

Схемы приложения нагрузок к каждому узлу представлены на рисунке 1.

Величины нагрузок и схемы испытания для узлов приняты по программе и методике испытаний на механическую прочность узлов и деталей контактной сети электрифицируемых дорог ЦНИИС.

3.1 Кронштейн СИП-3.

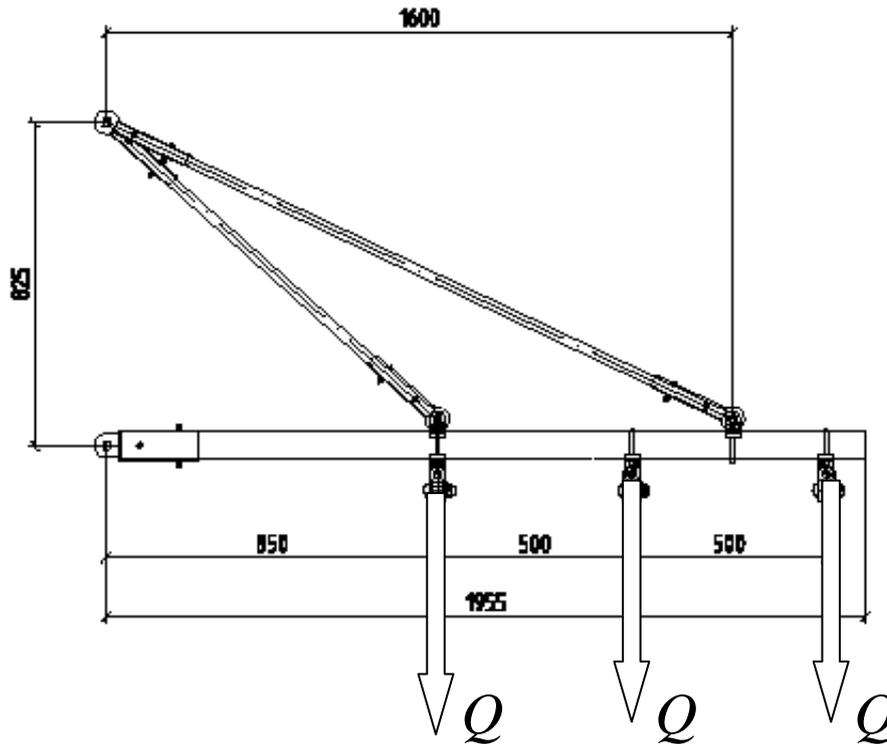


Рисунок 1 – Схема приложения нагрузок к кронштейну СИП-3

В таблице 1 приведены нагрузки испытаний кронштейна СИП-3.

Таблица 1 – Нагрузки при испытании

Тип кронштейна	Нагрузка, кН		Величины прогибов, мм	
	Допуск.	Испыт.	Допуск.	Испыт.
			<u>При нагр.</u> Остаточн.	<u>При нагр.</u> Остаточн.
СИП-3	1,7	2,1	13,03	12,5

При нагрузке $Q = 2,1$ кН прогиб составил 12,5 мм, что составляет 1/156 к длине кронштейна (при допустимом значении 1/150 (13,03 мм) при испытательной нагрузке).

При указанных допускаемой и испытательной нагрузках деформаций узлов нет.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

4.1. Представленный ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» на предварительные испытания кронштейн СИП-3 (черт. 3320-1.0.0.00) по проекту № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов» соответствует требованиям нормативно-технической документации.

4.2. Кронштейн СИП-3(черт. 3320-1.0.0.00) выдержал механические испытания и может быть рекомендован к опытной эксплуатации на объектах ОАО «РЖД».

Председатель



Прямыцын А.А.

Члены комиссии



Кочунов Ю.А.



Карякин Р.А.



Сердюк С.П.

ПРОГРАММА И ПРОТОКОЛ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

СОГЛАСОВАНО:

к.т.н., руководитель

ИЦ ТСЖТ УрГУПС


Н. И. Иванов

« 14 » марта 2016



УТВЕРЖДАЮ:

Проректор УрГУПС

к. т. н., доцент


Бушуев С.В.

« 14 » марта 2016



к.т.н., профессор

каф. «Электрические машины»


А. П. Сухогузов

« 14 » марта 2016

ПРОГРАММА

ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

Руководитель:

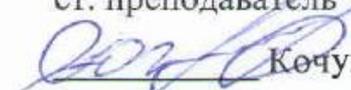
доктор технических наук,

профессор УрГУПС


Аржанников Б.А.

Исполнитель:

ст. преподаватель УрГУПС


Кочунов Ю.А.

Цель испытаний

Целью настоящих испытаний является исследование и оценка электрических параметров полимерного кронштейна для воздушных линий электропередачи (ЛЭП) напряжением 6–10 кВ устройств сигнализации централизации и блокировки (СЦБ) и продольного электроснабжения (ПЭ) в загрязненном и увлажненном состоянии.

Объект испытаний

В качестве объекта исследований принимается полимерный кронштейн КПСИП-3 производства ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» г. Екатеринбург.

Испытаниям подвергаются опытные образцы межфазной части траверсы кронштейн КПСИП-3, выполненный по рабочей документации (РД) ОАО ЦНИИС – РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов». Техническое состояние объекта испытаний соответствует следующим требованиям:

- РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов»;
- Технические условия ТУ 5264-882-01393674-2015;
- Технические условия ТУ 2296-001-90075275-2011.

Электрические испытания полимерного кронштейна в загрязненном и увлажненном состояниях проводятся в соответствии со стандартами:

- ГОСТ 10390-86 «Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ». Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии;
- ГОСТ 28856 «Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные. Общие технические условия»;
- ГОСТ 1516.2 «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции»;
- ГОСТ Р 51204-98 «Изоляторы стержневые полимерные для контактной сети железных дорог». Общие технические условия;

– СТО 56947007-29.120.90.033-2009 «Траверсы изолирующие полимерные для опор ВЛ 110-220 кВ». Общие технические требования, правила приемки и методы испытаний;

– СТО 56947007-29.240.144-2013 «Электрооборудование на напряжение свыше 3 кВ. Методы испытаний внешней изоляции в загрязненном состоянии»;

– ГОСТ Р 8.568-97 «Государственная система обеспечения единства измерений. Аттестация испытательного оборудования». Основные положения.

В ходе испытаний исследуются электрические свойства полимерного кронштейна.

Термины и определения

Полимерный кронштейн КПСИП-3 (в тексте программы испытаний: полимерный кронштейн, кронштейн, КПСИП-3): кронштейн для фиксации самонесущих изолированных проводов воздушной ЛЭП напряжением 6–10 кВ, выполненный из профильного электроизоляционного стеклопластика СПП-ЭВ(Н).

Изоляционная часть: часть полимерного кронштейна КПСИП-3, несущая механическую и электрическую нагрузки.

Фазная изоляционная часть: часть полимерного кронштейна КПСИП-3, между точкой приложения потенциала фазы и заземленной частью кронштейна (оконцеватель траверсы), точкой крепления кронштейна к опоре.

Межфазная изоляционная часть: часть полимерного кронштейна КПСИП-3, между точками приложения потенциала разных фаз (узла крепления проводов фаз).

Испытуемый образец: часть полимерного кронштейна (фазная или межфазная), к которой подается испытательное напряжение.

Удельная поверхностная электрическая проводимость слоя загрязнения (χ), мкСм: Величина, определяемая делением коэффициента формы изоляционной конструкции или участка его поверхности на сопротивление поверхно-

сти изоляционной конструкции или её участка в состоянии насыщения слоя загрязнения влагой.

Ток утечки: Ток, протекающий по поверхности испытуемого образца при приложении к нему испытательного напряжения.

Сопротивление поверхности изолятора (r), Ом: Отношение приложенного к испытуемому образцу напряжения к протекающему по его поверхности току утечки.

Испытательное напряжение: Приложенное к испытательному образцу напряжение с заданным значением, формой и длительностью.

Перекрытие изоляционной части: Полный разряд вдоль поверхности испытательного образца, соединяющей заземленную часть испытуемого образца и часть, к которой приложено испытательное напряжение.

Разрядное напряжение: Напряжение, при котором происходит перекрытие изоляционной части испытательного образца.

50 %-ное разрядное напряжение ($U_{50\%}$): Приложенное к испытательному образцу напряжение, при котором вероятность его перекрытия равна 0,5.

Насыщение слоя загрязнения влагой: Наибольшее количество влаги, которое может без стекания с поверхности изоляционной части содержаться в слое загрязнения (при этом достигается наименьшее значение сопротивления слоя загрязнения).

Дополнительные термины и определения использованы в соответствии с СТО 56947007-29.120.90.033-2009 и СТО 56947007-29.240.144-2013.

Общие указания

Для испытаний используют испытательные образцы полимерного кронштейна, загрязняющиеся следующими методами:

ПЗ – предварительного загрязнения;

СТ – соленого тумана.

Для испытаний методом ПЗ изоляционные части кронштейна, необходимо искусственно покрыть равномерным слоем загрязняющего вещества. В качестве загрязняющего вещества должны применяться материалы или композиции, имеющие в своем составе вещества, растворимые в воде и образующие электролит, создающий на поверхности слой с заданной проводимостью, а также связующее или цементирующее вещество. Дополнительные указания к этому методу приведены в Приложении 1 ГОСТ 10390-86.

Для испытаний методом СТ изоляционные части полимерного кронштейна должны быть установлены в помещении (стенде), которое заполняется соленым туманом, создаваемым путем распыления в воздухе раствора поваренной соли (NaCl) в воде. Дополнительные указания к этому методу приведены в Приложении 2 ГОСТ 10390-86.

В процессе электрических испытаний полимерного кронштейна в загрязненном и увлажненном состояниях определяются: удельная поверхностная проводимость изоляционных частей; 50 %-ное разрядное напряжение.

Испытания проводятся на укороченных образцах траверсы кронштейна, равных длине межфазного участка (так как этот участок находится в более жестких условиях) полимерного кронштейна (рисунок 1), которые устанавливаются в горизонтальном положении в соответствии с их рабочим положением.

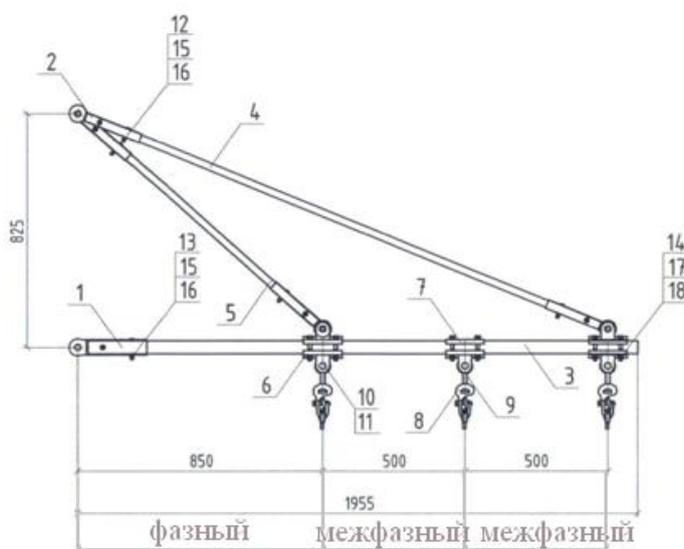


Рисунок 1 – Полимерный кронштейн КПСИП-3

На рисунке 1 показаны фазный и межфазные участки, а также узлы и детали кронштейна: 1 – оконцеватель траверсы; 2 – оконцеватель тяги; 3 – траверса; 4 – тяга первая; 5 – тяга вторая; 6 – плашка нижняя (ЛЭЗ.42.1678-Ш); 7 – плашка (ЛЭЗ.42.2348); 8 – седло одинарное под пестик (КС 009); 9 – серьга (КС 075); 10 – валик 22×55 (КС 084); 11 – шплинт 5×40; 12 – болт М6×50; 13 – болт М6×70; 14 – болт М12×75; 15 – гайка М6; 16 – шайба 6; 17 – гайка М12; 18 – шайба 12.

Методика подготовки объекта к испытаниям

Перед испытаниями производится тщательный осмотр объекта испытаний с целью выявления возможных неисправностей и дефектов, как изоляционных частей кронштейна, так и дефектов соединительных металлических элементов согласно ТУ 5264-882-01393674-2015.

При подготовке объекта к электрическим испытаниям предусматривается проведение следующих работ [ГОСТ 10390-86, СТО 56947007-29.240.144-2013]:

1) оборудование рабочей зоны при проведении электрических испытаний в загрязненном и увлажненном состоянии:

- монтаж стенда для проведения электрических испытаний,
- монтаж изоляционных частей на стенде,
- подключение и настройка измерительного оборудования;

2) изоляционные части, предназначенные для испытаний, до нанесения слоя загрязнения должны быть тщательно очищены от грязи и жиров;

3) используемые для очистки изоляционных частей полимерного кронштейна посторонние материалы после очистки должны быть удалены с поверхности изоляционных частей, с тем чтобы не могли повлиять на результаты испытаний.

Оборудование рабочей зоны

Оборудование рабочей зоны при проведении электрических испытаний в загрязненном и увлажненном состоянии осуществляется в «ИЦ ТСЖТ УрГУПС» (рисунок 2).



Рисунок 2 – Рабочая зона проведения электрических испытаний

Стенд для проведения электрических испытаний полимерного кронштейна представляет собой короб (рисунок 3), обеспечивающий создание необходимых условий в соответствии с требованиями проведения испытаний и техники безопасности.



Рисунок 3 – Испытательный стенд

Монтаж изоляционных частей кронштейна на стенде (рисунок 4), осуществляется с помощью дополнительных изоляционных конструкций, с целью предотвратить прохождение электрических величин (тока и напряжения) по конструкции стенда.



Рисунок 4 – Монтаж испытуемого образца на испытательном стенде

Подключение и настройка измерительного оборудования осуществляется в соответствии с ГОСТ Р 8.568-97.

Используемое оборудование:

1. Аппарат АИД-70Ц (свидетельство RU.C.34.004 А №32401 срок поверки – годен до 11.07.2018 г.). Основные технические характеристики приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики аппарата АИД-70 Ц

Наименование	Пределы
Диапазон регулирования напряжения (постоянного/переменного)	0-70/0-50 кВ
Ток нагрузки при постоянном/переменном напряжении	0-10 мА/0-50 мА
Непосредственное измерение напряжения на нагрузке с относительной (абсолютной) погрешностью	не более 3%
Защита от превышения максимального напряжения и тока нагрузки	есть
Пределы измерения тока на дополнительном диапазоне для переменного/постоянного тока	0-2000 мкА/ 0-1000 мкА
Напряжение питания	(220±22) В, 50 Гц

2. Измеритель влажности и температуры ТКА-ТВ (свидетельство о поверке ФБУ Уралтест №734809 срок поверки – годен до 06.11.2016 г.). Основные технические характеристики:

- диапазон измерения влажности, % отн. 10–98;
- диапазон измерения температуры, °С: 0—50;
- основная абсолютная погрешность измерения относительной влажности при температуре 20 ± 5 °С, % отн. не более;
- основная абсолютная погрешность измерения температуры при температуре окружающего воздуха 20 ± 5 °С, °С не более $\pm 0,5$.

Для контроля и сравнения показаний влажности и температуры применен гигрометр психрометрический ВИТ-1.

3. Гигрометр психрометрический ВИТ-1. Основные технические характеристики приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Технические характеристики гигрометра психрометрического ВИТ-1

Наименование	Параметр
Модель гигрометра	ВИТ-1
Диапазон измерения относительной влажности, %	20 ÷ 90
Температурный диапазон измерения влажности, °С	5 ÷ 25
Диапазон измерения температуры, °С	0 ÷ 25
Цена деления шкалы термометров, °С	0,20
Абсолютная погрешность термометров, °С	$\pm 0,2$
Термометрическая жидкость	Толуол
Межповерочный интервал, мес	24
Габаритные размеры, не более, мм	295×120×50
Масса, не более, кг	0,35
Цена, руб.	350 / 500*

4. Увлажнитель воздуха *Polaris PUN 1704*. Основные технические характеристики:

- назначение прибора – увлажнение воздуха;
- потребляемая мощность – 38 Вт;
- тип увлажнителя – ультразвуковой;
- емкость резервуара для воды – 4 л;
- расход воды – 300 мл/ч;

– управление – механическое.

Для регистрация тока утечки, сопротивления поверхности изолятора (r), и испытательного напряжения использован измеритель параметров электроизоляции *MIC-10k1*.

5. Измеритель параметров электроизоляции *MIC-10k1* (свидетельство о поверке №ПРВ1-В40278 срок поверки – годен до 19.10. 2016 г.). Основные технические характеристики приведены в таблице 3.

Таблица 3 – Технические характеристики аппарата *MIC 10k*

Диапазон отображения	Разрешение	Основная погрешность
0,0...999 кОм	1 кОм	± (3 % и.в. + 10 е.м. р.)
1,00...9,99 МОм	0,01 МОм	
10,0...99,9 МОм	0,1 МОм	
100...999 МОм	1 МОм	
1,00...9,99 ГОм	0,01 ГОм	
10,0...99,9 ГОм	0,1 ГОм	
100...999 ГОм	1 ГОм	± (3,5 % и.в. + 10 е.м. р.)
1,00...9,99 ТОм	0,01 ТОм	± (7,5 % и.в. + 10 е.м. р.)
10,0...19,9 ТОм	0,1 ТОм	± (12,5 % и.в. + 10 е.м. р.)
20,0...40,0 ТОм	0,1 ТОм	± (12,5 % и.в. + 10 е.м. р.) В РФ не нормируется

Характеристика загрязняющего вещества

В качестве загрязняющего вещества, согласно ГОСТ 10390 используется суспензия 40 г каолина на 1000 г воды с необходимым содержанием NaCl. Загрязняющее вещество наносится на испытуемый образец путем его погружения (полного окунания) в раствор. При нанесении на полимерную изоляционную конструкцию загрязнителя необходимо окунуть образец в суспензию, промыть проточной водой, снова погрузить в загрязнитель и еще раз промыть, повторить 2–3 раза, согласно СТО 56947007-29.240.144-2013.

Взвешивание загрязнителя произведено с помощью весов лабораторных квадрантных ВЛКТ-500 г. – М (свидетельство о поверке ФБУ Уралтест № 734809 срок поверки годен до 06.11.2016 г). Технические характеристики весов:

- пределы взвешивания – 500 г;
- дискретность отсчета – 1 г;
- погрешность измерения – ± 20 мг;
- технические характеристики – наличие механизма компенсации тары;
- исполнение – общепромышленное;
- габаритные размеры, мм – 370×210×320 (весы); диаметр 90...150 (чашка);
- масса, кг – 10.

Соленость тумана

Концентрация раствора соли (NaCl) выбирается в соответствии с ГОСТ 10390 исходя из диапазона 2,5224 г/л. Подача соленого тумана осуществляется при помощи увлажнителя воздуха с непрерывной подачей в процессе приложения испытательного напряжения. Время проведения испытания, согласно ГОСТ 10390, не менее 30 минут.

Методика проведения испытаний

Испытания проводятся при нормальных атмосферных условиях ($t_0 = 20$ °С, $P_0 = 760$ мм рт. ст., $h_0 = 11$ г/м³) на трех образца каждой изоляционной части кронштейна в соответствии с ГОСТ 10390, ГОСТ 1516.2.

Электрические испытания в загрязненном и увлажненном состоянии полимерного кронштейна необходимо проводить длительным воздействием напряжения (ПД) с целью.

1. Проверки электрической прочности изоляционных частей кронштейна в исходном состоянии (не загрязненном) при нормированном испытательном напряжении.

2. Определение степени загрязнения изоляционных частей кронштейна, загрязненных методом ПЗ, при котором нормированное напряжение равно 50 %-ному разрядному напряжению.

3. Определение максимальной выдерживаемой солености при испытании методом СТ и определение 50 %-ного разрядного напряжения при данной степени загрязнения.

ПД – длительное приложение напряжения к загрязненной изоляционной части кронштейна с последующим его увлажнением или к чистой изоляционной части с последующим осаждением на него соленого тумана.

При испытаниях способом ПД к загрязненным частям кронштейна до начала увлажнения прикладывается напряжение, значение которого в течение всего времени испытания остается неизменным. После этого изоляционные части увлажняются мелкокапельной влагой. Испытание продолжается до тех пор, пока изоляционные части не выдержат приложенное напряжение в течение заданного времени. Длительность испытания должна приблизительно в два раза превышать время, необходимое для насыщения слоя загрязнения влагой, но не менее 15 минут.

50 %-ное разрядное напряжение определяется способом «вверх-вниз». По этому способу испытательное напряжение изменяют от опыта к опыту на постоянную величину, составляющую 5–7; ожидаемого 50 %-ного разрядного напряжения. Порядок изменения напряжения следующий: если на данной ступени произошел разряд, то необходимо перейти на ступень ниже; если разряда не было – на ступень выше.

При испытаниях по методу СТ к чистым изоляционным частям кронштейна прикладывается напряжение, после чего включается туманообразующая установка, и это напряжение держится приложенным до момента перекрытия или в течение не менее 30 минут. При этом возможны два способа оценки качества изоляции:

1. Определение максимальной выдерживаемой солености.

Опыт начинается с туманом большой солености, при которой происходит перекрытие изоляционной части. Последующие испытания проводятся при уменьшении степени солености тумана до тех пор, пока изоляционные части кронштейна не выдержат приложенного напряжения в течение 30 минут без перекрытия, после чего опыт на данной степени солености повторяется. Если изоляционные части выдержали четыре таких приложения напряжения, то это значение принимается за выдерживаемую соленость.

2. Определение 50 %-ного разрядного напряжения.

50 %-ное разрядное напряжение определяется, как было указано выше.

Результаты испытаний

Полимерный кронштейн КПСИП-3 считается выдержавшим электрические испытания при условии, что изоляционные части кронштейна, находящиеся под фазным и междуфазным напряжением должны иметь 50 %-ные разрядные напряжения промышленной частоты в загрязненном и увлажненном состоянии не ниже значений, приведенных в таблице 4.

Удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения (СЗ), в соответствии с ПУЭ-7, должна приниматься (не менее): для 1-й СЗ – 5 мкСм, 2-й СЗ – 10 мкСм, 3-й СЗ – 20 мкСм, 4-й СЗ – 30 мкСм. Связь показателя СЗ с удельной поверхностной проводимостью слоя загрязнения изоляции χ определяется по таблице 5.

Таблица 4 – 50 %-ные разрядные напряжения участков полимерного кронштейна, находящиеся под фазным и междуфазным напряжением

Номинальное напряжение ЛЭП, кВ	50 %-ные разрядные напряжения, кВ	
	Участки кронштейна, находящиеся под фазным напряжением	Участки кронштейна, находящиеся под междуфазным напряжением
	действующие значения	действующие значения
6	8	14
10	13	23

Таблица 5 – Связь показателя СЗ с удельной поверхностной проводимостью слоя загрязнения изоляции χ

Степень загрязнения	Удельная поверхностная проводимость слоя загрязнения χ , мкСм
1	$0 \leq \chi < 10$
2	$10 \leq \chi < 20$
3	$20 \leq \chi < 30$
4	$30 \leq \chi$

Требования техники безопасности при проведении электрических испытаний

При монтаже испытательного стенда должны соблюдаться общие требования техники безопасности в соответствии с ГОСТ 12.0.001.

При проведении электрических испытаний должны соблюдаться общие требования техники безопасности и производственной санитарии, а также инструкции по охране труда и технике безопасности, относящиеся к конкретным видам работ, предусмотренных в «ИЦ ТСЖТ УрГУПС».

Измерительные приборы, приспособления не должны нарушать работу электрических установок при проведении испытаний и препятствовать нормальному взаимодействию всех элементов кронштейна, а также должны быть надёжно закреплены, чтобы исключить возможность падения и повреждения при испытаниях.

Испытательный центр технических средств железнодорожного транспорта
(ИЦ ТСЖТ УрГУПС)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, каб. Б1-93

Утверждаю
Руководитель ИЦ ТСЖТ УрГУПС
Н. Д. Иванов
(подпись) (инициалы, фамилия)

« 14 » марта 2016 г.



ПРОТОКОЛ ИСПЫТАНИЙ

Полимерный кронштейн КПСИП-3 3320-3.0.0.00

обозначение и наименование продукции, код ОКП

(на 5 листах)

От “14” марта 2016 г.

№ИЦ-45/2

Протокол испытаний *Полимерный кронштейн КПСИП-3*
от «14» марта 2016г. №ИЦ-45/2

Лист № 2

В соответствии с

Заявкой № 2 от 12 февраля 2016 года

заявкой, договором, контрактом и др.

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д.66

ИЦ ТСЖТ УрГУПС провел в период с «15» февраля 2016г.
наименование ИЦ по «14» марта 2016г.

испытания Полимерного кронштейна КПСИП-3 3320-3.0.0.00
обозначение и наименование изделия, номер чертежа, ТУ, код ОКП

на соответствие требованиям ПУЭ-7, ГОСТ 10390-86; ГОСТ 28856;
ГОСТ 1516.2; ГОСТ Р 51204-98; СТО
56947007-29.120.90.033-2009; СТО
56947007-29.240.144-2013.

обозначение и наименование нормативных документов

Испытания проводились ИЦ ТСЖТ УрГУПС, Стендовые
место и условия проведения испытаний

Образцы для испытаний в количестве 10 шт. отобраны
представителем Заказчика из партии № _____
наименование ОС или ИЦ

Характеристика объекта испытаний -

Условия хранения образцов до проведения испытаний г. Екатеринбург,
ул. Колмогорова, д.66, лаб. Б1-95, температура в помещении +20°С, влажность 56%
место хранения, условия окружающей среды

Образцы поступили на испытание «15» февраля 2016 г.

Испытания проводились по методике изложенной в ГОСТ 10390-86
обозначение и

СТО 56947007-29.240.144-2013

наименование нормативного документа

Таблица Б.1 – Сведения об испытательном оборудовании

Наименование вида испытаний и (или) определяемой характеристики	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) испытательного оборудования	Сведения об аттестации (номер и дата аттестата, периодичность аттестации)
<i>Электрические</i>	<i>Аппарат изоляции диэлектриков АИД-70Ц, Зав. №737</i>	<i>Свидетельство RU.C.34.004 А №32401 от 11.08.2015 г срок поверки годен до 11.08.2016 г</i>

Знесение исправлений и дополнений не допускается. Изменения и дополнения оформляются отдельным документом, оформленным в установленном порядке. Частичная перепечатка протокола без разрешения ИЦ запрещена.

Всего листов 5

Лист 2

Протокол испытаний *Полимерный кронштейн КПСИП-3*
от «14» марта 2016г. №ИЦ-45/2

Таблица Б.2 – Сведения о средствах измерений

Наименование определяемой характеристики (параметра) ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) средства измерений	Сведения о поверке (номер и дата свидетельства, периодичность поверки)
<i>Вес образцов</i>	<i>Весы лабораторные аналитические ВЛКТ-500г –М, Зав. №154</i>	<i>Свидетельство №734809 от 06.11.2015 г. Годен до 06.11.2016 г.</i>
<i>Относительная влажность</i>	<i>Измеритель влажности и температуры ТКА-ТВ, Зав. №20 1217п</i>	<i>Свидетельство №665598 от 16.03.2015 г. Годен до 16.03.2016 г.</i>
<i>Поверхностное сопротивление</i>	<i>Измеритель параметров электроизоляции МС 10к1, Зав. №В40278</i>	<i>Протокол №ПРВ1-В40278 от 19.10.2015г., Годен до 19.10.2016</i>

Таблица Б.3 – Результаты испытаний

Контролируемая характеристика (параметр)	Единицы измерения	Нормативное значение параметра	Фактическое значение параметра	Заключение о соответствии (да/нет)
<i>Влагоразрядное напряжение (50%-ное разрядное напряжение) с защитной оболочкой Вискит ПК-68</i>	кВ	23 <i>(при степени загрязнения I Расчетная соленость воды, до 2 г/л)</i>	23	да
		23 <i>(при степени загрязнения II Расчетная соленость воды, от 2 до 10 г/л)</i>	23	да
		23 <i>(при степени загрязнения III Расчетная соленость воды, от 10 до 20 г/л)</i>	23	да
		23 <i>(при степени загрязнения IV Расчетная соленость воды, от 20 до 40 г/л)</i>	23	да
<i>Влагоразрядное напряжение (50%-ное разрядное напряжение) без защитной оболочки</i>	кВ	23 <i>(при степени загрязнения I Расчетная соленость воды, до 2 г/л)</i>	23	да

Внесение исправлений и дополнений не допускается. Изменения и дополнения оформляются отдельным документом, оформленным в установленном порядке. Частичная перепечатка протокола без разрешения ИЦ запрещена.

Всего листов 5
Лист 3

Протокол испытаний *Полимерный кронштейн КПСИП-3*
от «14» марта 2016г. №ИЦ-45/2

Контролируемая характеристика (параметр)	Единицы измерения	Нормативное значение параметра	Фактическое значение параметра	Заключение о соответствии (да/нет)
<i>Влагоразрядное напряжение (50%-ное разрядное напряжение) без защитной оболочки</i>	кВ	23 (при степени загрязнения II Расчетная соленость воды, от 2 до 10 г/л)	23	да
		23 (при степени загрязнения III Расчетная соленость воды, от 10 до 20 г/л)	19,5	нет
		23 (при степени загрязнения IV Расчетная соленость воды, от 20 до 40 г/л)	11,14	нет
<i>Удельная поверхностная проводимость с защитной оболочкой Виксинт ПК-68</i>	мкСм	При степени загрязнения I от 0 до 10 (Расчетная соленость воды, до 2 г/л)	0,0008	да
		При степени загрязнения II от 10 до 20 (Расчетная соленость воды, от 2 до 10 г/л)	0,0008	да
		При степени загрязнения III от 20 до 30 (Расчетная соленость воды, от 10 до 20 г/л)	0,05	да
		При степени загрязнения IV, более 30 (Расчетная соленость воды, от 20 до 40 г/л)	0,188	да
<i>Удельная поверхностная проводимость без защитной оболочки</i>	мкСм	При степени загрязнения I от 0 до 10 (Расчетная соленость воды, до 2 г/л)	0,064	да
		При степени загрязнения II от 10 до 20 (Расчетная соленость воды, от 2 до 10 г/л)	0,072	да

Внесение исправлений и дополнений не допускается. Изменения и дополнения оформляются отдельным документом, оформленным в установленном порядке. Частичная перепечатка протокола без разрешения ИЦ запрещена.

Всего листов 5

Лист 4

Протокол испытаний Полимерный кронштейн КПСИП-3
от «14» марта 2016г. №ИЦ-45/2

Контролируемая характеристика (параметр)	Единицы измерения	Нормативное значение параметра	Фактическое значение параметра	Заключение о соответствии (да/нет)
Удельная поверхностная проводимость без защитной оболочкой	мкСм	При степени загрязнения III от 20 до 30 (Расчетная солёность воды, от 10 до 20 г/л)	2,79	да
		При степени загрязнения IV, более 30 (Расчетная солёность воды, от 20 до 40 г/л)	11,45	да

Заключение:

Полимерный кронштейн, выполненный из стеклопластика профильного электроизоляционного СПП-ЭИ(Н), цилиндрической гладкой формы, предназначенный для эксплуатации на воздушных линиях продольного электропитания напряжением 6-10 кВ, без защитной оболочки соответствует требованиям ГОСТ 10390 и ПУЭ-7 и может применяться в I и II зонах со степенью загрязнения до 20мкСм. Полимерный кронштейн в защитной оболочке Вискит ПК-68 соответствует требованиям ГОСТ 10390 и ПУЭ-7 и может применяться с I по IV зонах загрязнения.

Так же отмечено, что незначительное повреждение защитной оболочки не оказывает влияния на изоляционные свойства конструкции.

Руководитель испытаний заместитель руководителя ИЦ Шварцман А.В.
должность, подпись, инициалы, фамилия

Ответственный исполнитель инженер И.А.Г. Гарбуличев
должность, подпись, инициалы, фамилия

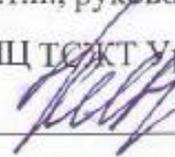
Внесение исправлений и дополнений не допускается. Изменения и дополнения оформляются отдельным документом, оформленным в установленном порядке. Частичная перепечатка протокола без разрешения ИЦ запрещена.

ПРОГРАММА И ПРОТОКОЛ
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

СОГЛАСОВАНО:

к.т.н., руководитель

ИЦ ТСОЖТ УрГУПС




Н. Д. Иванов

«11» 06 2015

УТВЕРЖДАЮ:

Проректор УрГУПС

к. т. н., доцент

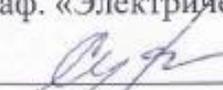



Бушуев С.В.

«11» 06 2015

к.т.н., профессор

каф. «Электрические машины»



А. П. Сухогузов

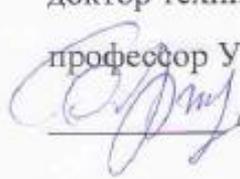
«11» 06 2015

ПРОГРАММА
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ
ПОЛИМЕРНОГО КРОНШТЕЙНА

Руководитель:

доктор технических наук,

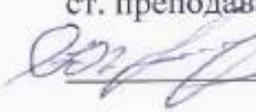
профессор УрГУПС



Аржанников Б.А.

Исполнитель:

ст. преподаватель УрГУПС



Кочунов Ю.А.

Екатеринбург 2015

Цель испытаний

Целью настоящих испытаний является исследование и оценка напряженно-го состояния (перемещения) полимерного кронштейна проводов при действии статической нагрузки в различных климатических режимах, регистрация и анализ изменения поверхностных емкостей и сопротивлений на межфазных участках кронштейна, а также испытания кронштейна кратковременным, повышенным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью и испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом.

Объект испытаний

В качестве объекта исследований принимается полимерный кронштейн ПКСИП-3 производства ООО «НПП «ЭЛЕКТРОМАШ» г. Екатеринбург.

Испытаниям подвергается опытный образец, кронштейн ПКСИП-3, выполненный по рабочей документации (РД) ОАО ЦНИИС – РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов». Техническое состояние объекта испытаний соответствует следующим требованиям:

1. РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов».
2. Технические условия ТУ 5264-882-01393674-2015.
3. Технические условия ТУ 2296-001-90075275-2011.
4. ГОСТ 28856 «Изоляторы линейные подвесные стержневые полимерные.

Общие технические условия».

5. ГОСТ 1516.2 «Электрооборудование и электроустановки переменного тока на напряжение 3 кВ и выше. Общие методы испытаний электрической прочности изоляции».

В ходе испытаний исследуются механические и электрические свойства полимерного кронштейна

Методика подготовки объекта к испытаниям

Перед испытаниями производится тщательный осмотр объекта испытаний с целью выявления возможных неисправностей и дефектов, как в целом конструкции кронштейна, так и дефектов соединительных металлических элементов согласно ТУ 5264-882-01393674-2015.

1. Термомеханические испытания

В процессе термомеханических испытаний определяются следующие характеристики: смещение оконцевателей, деформации или растрескивания, прогиб сжато-изогнутых элементов, который не должен превышать $1/150$ длины элемента, а также регистрация и анализ изменения поверхностных емкостей и сопротивлений на межфазных участках кронштейна.

При подготовке объекта к термомеханическим испытаниям предусматривается проведение следующих работ:

- монтаж кронштейна на испытательном стенде;
- монтаж датчика перемещений, талрепа, динамометра;
- сборка электрических схем;
- монтаж мобильного прибора «Доктор-060Z», цифрового тераомметра *MIC-5000*;
- тарировка датчиков;
- оборудование рабочей зоны регистрации полученных данных.

Монтаж кронштейна на испытательном стенде осуществляется в климатической камере «ИЦ ТСЖТ УрГУПС» (рисунок 1).

Для регистрации измерения статической силы растяжения или сжатия используется электронный динамометр серии АЦДУ-50И-1, класс точности 1 с погрешностью не более 5 %. Наибольший предел измерения 50 кН (рисунок 2).



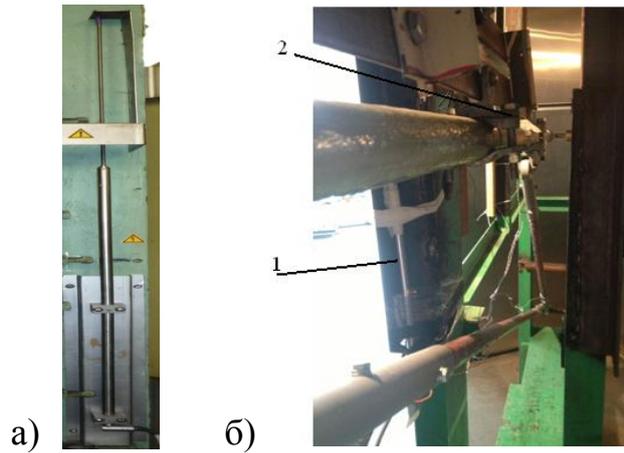
1 – траверса; 2 – тяга(1); 3 – тяга(2); 4 – узел крепления проводов; 5 – металлическая балка (уголок); 6 – стяжной зажим (талреп); 7 – динамометр; 8 – болт; 9 – опорная плита; 10 – узел крепления траверсы; 11 – узел крепления тяг

Рисунок 1 – Внешний вид испытательного стенда
внутри климатической камеры



Рисунок 2 – Внешний вид динамометра АЦДУ-50И-1

Для регистрации перемещения используется комплекс «Spider 8», состоящий из датчика перемещения (рисунок 3), блока сбора и обработки данных (рисунок 4).



а – внешний вид датчика; б – датчик, закрепленный на испытательном стенде
(1 датчик, 2 планка датчика)

Рисунок 3–Датчик перемещения «Spider 8»



Рисунок 4 – Блок - система сбора данных «Spider 8»

Основные технические характеристики устройства «Spider 8» приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Технические характеристики устройства «Spider 8»

Основные технические характеристики		
Наименование	Значение	Единица измерения
Класс точности	0,1	–
Максимальное количество каналов	8	шт.
Частота оцифровки	9600	Величин в секунду на один канал
Количество усилителей	4	шт.
Напряжение возбуждения датчиков	2,5	В
Несущая частота	4800	Гц
Рабочий температурный диапазон	от - 20 до +60	°С
Потребляемая мощность	4	Вт
Напряжение питания	15	В

Методика проведения испытаний

Испытания на термомеханическую прочность проводятся воздействием на кронштейн четырех 24-часовых циклов охлаждения и нагревания от минус 60 °С до плюс 50 °С и последующего охлаждения до температуры окружающего воздуха с одновременным приложением механической силы, равной P_k , которая должна оставаться постоянной в течение каждого цикла испытаний.

Механическая нагрузка прикладывается к кронштейну перед началом каждого цикла температурного воздействия при комнатной температуре и полностью снимается в конце цикла.

Минимальная и максимальная температура рабочей среды должна быть выдержана в течение не менее 4 часов температурного цикла, как показано на рисунке 6.

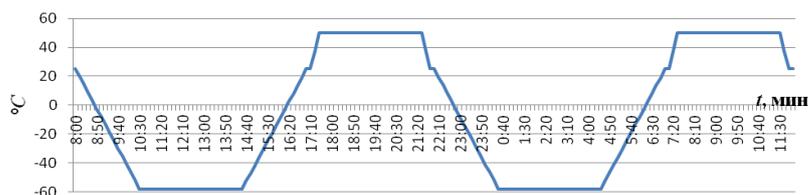
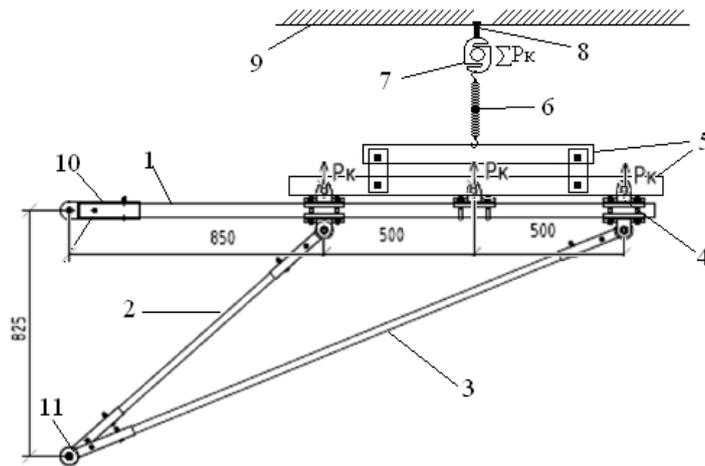


Рисунок 6 – Цикличность испытаний

Величины нагрузок и схемы испытания для узлов приняты по ТУ 5264-882-01393674-2015.

Схемы приложения нагрузок к каждому узлу представлены на рисунке 7.

Для обеспечения нагрузки $P_k = 1,7$ кН, для каждого узла фиксации проводов, на стенде, путем соединения металлических балок (уголков) – 5 (рисунок 7), при помощи стяжного зажима (талрепа) – 6, через динамометр (АЦДУ -50И-1) – 7, зафиксированный болтом – 8 к опорной плите – 9, устанавливается суммарная распределенная нагрузка $\sum P = 5,1$ кН (см. рисунок 7).



1 – траверса; 2 – тяга(1); 3 – тяга(2); 4 – узел крепления проводов; 5 – металлическая балка (уголок); 6 – стяжной зажим (талреп); 7 – динамометр; 8 – болт; 9 – опорная плита; 10 – узел крепления траверсы; 11 – узел крепления тяг.

Рисунок 7 – Схема приложения нагрузок P_k к кронштейну КПСИП-3

На траверсу, в точке фиксации второго провода, крепится датчик перемещения «Spider 8».

Для определения поверхностных сопротивлений и емкостей кронштейн делится на участки (1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 6–8, 7–9) относительно узлов крепления измерительных проводников (рисунок 8).

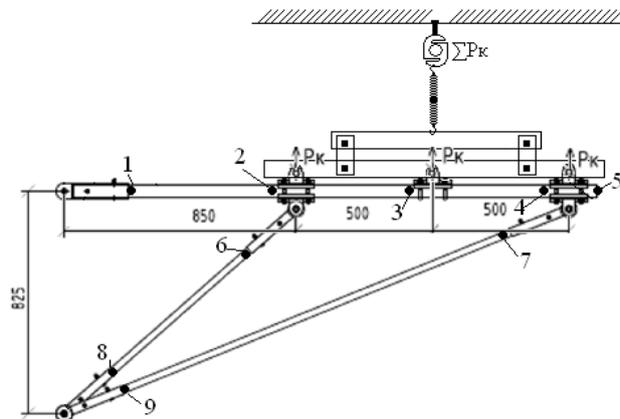


Рисунок 8 – Схема присоединения измерительных проводников к элементам кронштейна КПСИП-3

К каждому из обозначенных узлов (см. рисунок 8) прикрепляются проводники, которые выводятся из климатической камеры (рисунок 9).

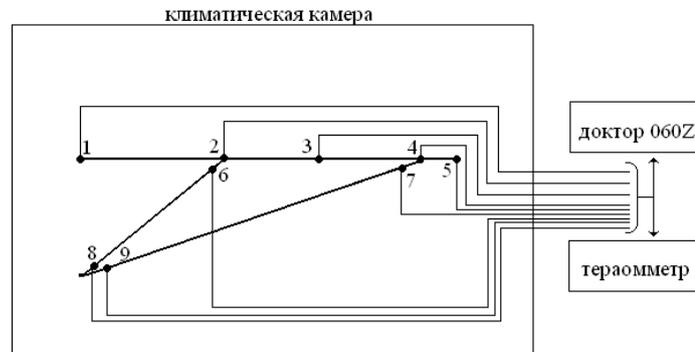


Рисунок 9 – Схема соединения проводников в узлах кронштейна

Регистрация и анализ поверхностных сопротивлений и емкостей производится по участкам кронштейна (1–2, 2–3, 3–4, 4–5, 6–8, 7–9).

Кронштейн считается выдержавшим испытания, если не произошло смещения оконцевателей, деформации или растрескивания, а также прогиб сжато-изогнутых элементов не превышает $1/150$ длины элемента.

Допустимые расчетные прогибы и прикладываемая нагрузка, на основании РД, показаны на рисунке 10.

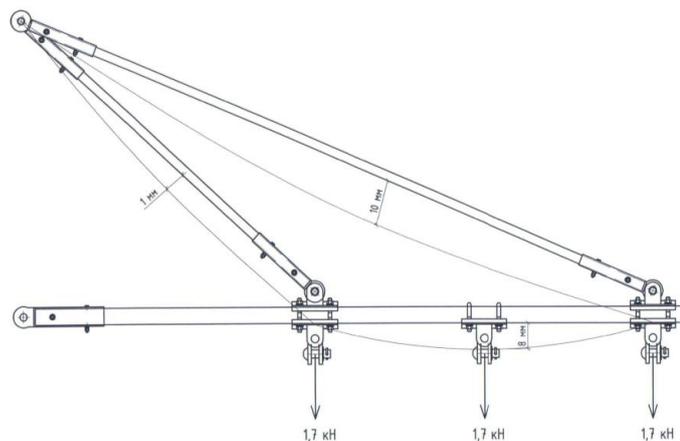


Рисунок 10 – Допустимые расчетные прогибы и прикладываемая нагрузка на кронштейн ПКСИП –3

Требования техники безопасности при проведении термомеханических испытаний

При монтаже полимерного кронштейна на испытательном стенде должны соблюдаться общие требования техники безопасности в соответствии с ГОСТ 12.0.001.

При проведении испытаний должны соблюдаться общие требования техники безопасности и производственной санитарии, а также инструкции по охране труда и технике безопасности, относящиеся к конкретным видам работ, предусмотренных в «ИЦ ТСЖТ УрГУПС».

Установленные приборы, приспособления не должны нарушать работу климатической камеры и препятствовать нормальному взаимодействию всех элементов кронштейна, а также должны быть надёжно закреплены, чтобы исключить возможность падения и повреждения при испытаниях.

2. Электрические испытания

В процессе испытания кронштейна кратковременным повышенным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью и испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом, определяются следующие характеристики: появление трещин, местной эрозии, науглероженных побегов общей длиной 10 см, пробой изоляционной части между фазой и землей, а также между фазами; стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом.

При подготовке объекта к электрическим испытаниям предусматривается проведение следующих работ:

- оборудование рабочей зоны при проведении испытаний кратковременным повышенным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью;

– оборудование рабочей зоны при проведении испытаний по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом.

Для регистрации кратковременного напряжения на кронштейн в сухом состоянии между фазой и заземленной частью использовался аппарат АИД-70 (рисунок 11).

Технические характеристики АИД-70:

$$\sim U_{\max} = 50 \text{ кВ}, \quad = U_{\max} = 70 \text{ кВ};$$

$$\sim I_{\max} = 20 \text{ мА}, \quad = I_{\max} = 12 \text{ мА};$$

Погрешность не более 4,5 %.



Рисунок 11 – Зона проведения испытаний аппаратом АИД-70

Для определения стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом использовался четырехступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН) (рисунок 12).

Четырехступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИН) предназначен для создания импульса аperiodической формы, соответствующего параметрам стандартной грозовой волны перенапряжений. Максимальное напряжение ГИН до 400 кВ.

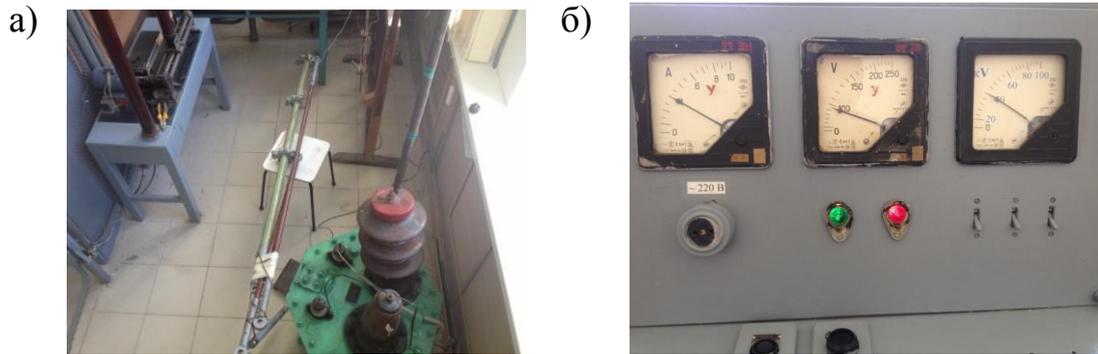


Рисунок 12 – Четырехступенчатый генератор импульсных напряжений (ГИИ)

Методика проведения испытаний

По завершению четвертого цикла термомеханических испытаний, не позднее чем через 24 часа, кронштейн должен быть испытан кратковременным напряжением в сухом состоянии, а также импульсным напряжением с крутым фронтом согласно п. 5.15 ТУ 5264-882-01393674-2015.

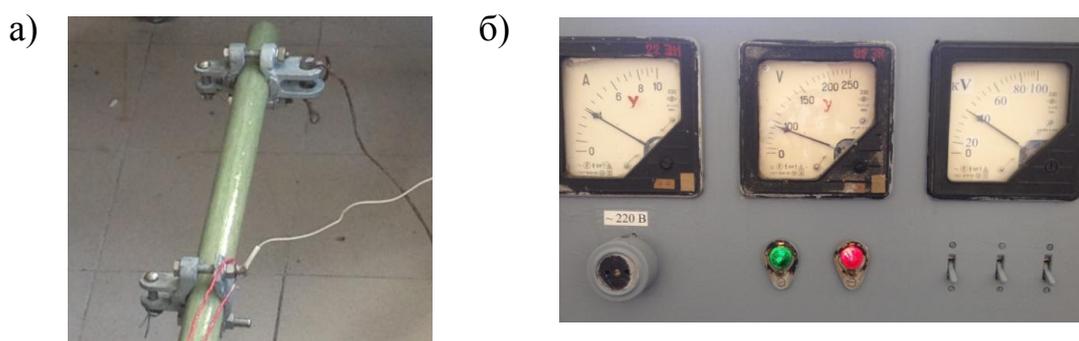
Испытание кратковременным напряжением промышленной частоты в сухом состоянии проводится по ГОСТ 1516.2 (7.4.2). Испытательное напряжение (40 кВ) на испытуемом образце выдерживается в течение 300 ± 5 с. Испытания проводятся на полном (не укороченном) образце кронштейна в сборке между фазой и землей, а также между фазами. Кронштейн установлен в испытательной ячейке аппарата АИД -70 (рисунок 13, а). Оконцеватели, предназначенные для крепления кронштейна к опоре, траверсы и тяг, заземляются, а узлы фиксации проводов соединяются проводником друг с другом, создавая один потенциал на зажимах. В ходе испытания подается переменное напряжение 40 кВ («фаза – земля»), частотой 50 Гц, ток 4 А. Под данной нагрузкой кронштейн выдерживается в течение 5 минут 300 ± 5 с (рисунок 13,б).



а – рабочая зона проведения испытания кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазой и заземленной частью;
 б – показания измерительных приборов

Рисунок 13 – Аппарат АИД-70

Дальний (от оконцевателя траверсы) узел фиксации провода (отсоединив тягу) соединяется с заземлением, а на центральный узел фиксации провода подается напряжение (рисунок 14, а). При этом в цепь последовательно включается амперметр. В ходе испытания подается переменное напряжение 40 кВ (между фазами), частотой 50 Гц, ток 4 А. Под данной нагрузкой кронштейн выдерживается в течение 5 минут (300 ± 5 с) (рисунок 14, б).



а – рабочая зона проведения испытания кронштейна кратковременным напряжением в сухом состоянии между фазами;
 б – показания измерительных приборов

Рисунок 14 – Аппарат АИД – 70

Испытания по определению стойкости к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом проводятся согласно ГОСТ 28856, РД №3320, ТУ 5264-882-01393674-2015. Установка для испытания импульсным напряжением с крутым фронтом должна создавать импульсы, амплитудное значение которых обеспечивает перекрытие на фронте воздействующего импульса. При этом разрядное напряжение должно быть не менее 0,5 и не более 0,9 амплитудного значения импульса.

Крутизна импульса K , кВ/мкс при испытании кронштейна определяется по формуле $K=U/T$, где U – амплитуда импульса, зарегистрированная при перекрытии изоляционной части кронштейна, кВ; T – условное время среза импульса, мкс.

Измерения проводятся в испытательной ячейке ГИН УрГУПС.

Кронштейн устанавливается на заземленной станине таким образом, чтобы узлы фиксации проводов находились под одним потенциалом, оконцеватели траверсы и короткой тяги соединяются между собой и соединяются с «иглой» испытательной установки.

В ходе испытания подается переменное импульсное напряжение, величина которого составила $U = 180$ кВ, длительность импульса составила $\tau = 0,15$ мкс. На рисунке 15 представлен фрагмент испытания импульсным напряжением с крутым фронтом при помощи ГИН с фиксацией разряда.



Рисунок 15 – Фрагмент испытания импульсным напряжением с фиксацией разряда

Кронштейн считается выдержавшим электрические испытания, если не появились трещины, местная эрозия, науглероженные побеги общей длиной 10 см и не произошло пробоя изоляционной части. Также не должно произойти смещения оконцевателей, деформации или растекания, разрывов защитной оболочки (изоляционной части) кронштейна.

Требования техники безопасности при проведении электрических испытаний

При проведении электрических испытаний должны соблюдаться общие требования техники безопасности и производственной санитарии, а также инструкции по охране труда и технике безопасности, относящиеся к конкретным видам работ, предусмотренных в лаборатории ТВН УрГУПС.

Измерительные приборы, приспособления не должны нарушать работу электрических установок при проведении испытаний и препятствовать нормальному взаимодействию всех элементов кронштейна, а также должны быть надёжно закреплены, чтобы исключить возможность падения и повреждения при испытаниях.

Испытательный центр технических средств железнодорожного транспорта (ИЦ ТСЖТ УрГУПС)

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Уральский государственный университет путей сообщения»
г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66, каб. Б1-93

Утверждаю

Руководитель ИЦ ТСЖТ УрГУПС

Н.Л. Иванов

(подпись)

(инициалы, фамилия)

“ 11 ” июня 2015 г.



ПРОТОКОЛ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ

Полимерный кронштейн КПСИП-3

обозначение и наименование продукции, код ОКП

(на 3 листах)

От “11” июня 2015 г.

№ИЦ-45/1

Протокол испытаний Полимерный кронштейн КПСИП-3
от «11» июня 2015г. №ИЦ-45/1

В соответствии с Заявкой №2 от 05 июня 2015 года
заявкой, договором, контрактом и др.

Уральский государственный университет путей сообщения (УрГУПС), г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, д.66

наименование и адрес предприятия-заявителя
ИЦ ТСЖТ УрГУПС провел в период с “05” июня 2014г.
наименование ИЦ по “11” июня 2015г.

испытания Полимерного кронштейна КПСИП-3 3320-3.0.0.00
обозначение и наименование изделия, номер чертежа, ТУ, код ОКП

на соответствие требованиям ГОСТ 28856, ГОСТ 1516.2
обозначение и наименование нормативных документов

Испытания проводились ИЦ ТСЖТ УрГУПС, Стендовые
место и условия проведения испытаний

Образцы для испытаний в количестве 1 шт. отобраны
представителем Заказчика из партии №
наименование ОС или ИЦ

Характеристика объекта испытаний -

Условия хранения образцов до проведения испытаний г. Екатеринбург,
ул. Колмогорова, д.66, лаб. Б1-95, температура в помещении +21°С, влажность 56%
место хранения, условия окружающей среды

Образцы поступили на испытание “04” июня 2015 г.

Испытания проводились по методике изложенной в ГОСТ 28856,
ГОСТ 1516.2
обозначение и

Таблица Б.1 – Сведения об испытательном оборудовании

Наименование вида испытаний и (или) определяемой характеристики	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) испытательного оборудования	Сведения об аттестации (номер и дата аттестата, периодичность аттестации)
<i>Устойчивость к воздействию климатических факторов</i>	<i>Климатическая камера Techno 7010Wi, зав. №0020910,</i>	<i>Аттестат №567/2014 от 02.10.2014 Годен до 02.10.2015</i>
<i>Электрические</i>	<i>Генератор импульсных напряжений ГИН-400, Инв. №210104001360816</i>	<i>Протокол калибровки №1 от 04.06.2015г.</i>
	<i>Аппарат изоляции диэлектриков АИД-70М, Зав. №853</i>	<i>Протокол калибровки №2 от 04.06.2015г.</i>

Таблица Б.2 – Сведения о средствах измерений

Наименование определяемой характеристики (параметра) ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) средства измерений	Сведения о поверке (номер и дата свидетельства, периодичность поверки)
<i>Линейные размеры</i>	<i>Штангенциркуль ШЦ-1-250, Инв. №04-ИЦ</i>	<i>Протокол калибровки №3 от 04.06.2015г.</i>

Внесение исправлений и дополнений не допускается. Изменения и дополнения оформляются отдельным документом, оформленным в установленном порядке. Частичная перепечатка протокола без разрешения ИЦ запрещена.

Протокол испытаний Полимерный кронштейн КПСИП-3
от «11» июня 2015г. №ИЦ-45/1

Наименование определяемой характеристики (параметра) ТСЖТ	Наименование, марка и номер (заводской или инвентарный) средства измерений	Сведения о поверке (номер и дата свидетельства, периодичность поверки)
Усилие	Динамометр электронный универсальный АЦДУ-50И-1 Зав. № 752	Протокол калибровки №4 от 04.06.2015г.

Таблица Б.3 – Результаты испытаний

Контролируемая характеристика (параметр)	Единицы измерения	Нормативное значение параметра	Фактическое значение параметра	Заключение о соответствии (да/нет)
<i>Термомеханическая прочность при температуре от минус 65⁰С до плюс 70⁰С:</i>				
- смещение оконцевателей	-	отсутствие	не зафиксировано	да
- трещиностойкость	-	отсутствие	не зафиксировано	
- прогиб сжатых изогнутых элементов	мм	не более 8	7,5	
Сухоразрядное напряжение пробоя	кВ	40	более 40	да
Трегинг-эрозионностойкость	-	отсутствие искрений	искры и треки не зафиксированы	да
Стойкость к воздействию импульсов напряжений с крутым фронтом	кВ/мкс	не менее 1000	1200 при $\tau=0,15$ мкс	да

Заключение:

Полимерный кронштейн КПСИП-3 выдержал термомеханические испытания и соответствует требованиям ГОСТ 28856, ГОСТ 1516.2.

Полимерный кронштейн КПСИП-3 по результатам термомеханических испытаний рекомендован к опытной эксплуатации на объектах ОАО «РЖД».

Руководитель испытаний заместитель руководителя ТМ (Мерзанин А.В.)
должность, подпись, инициалы, фамилия

Ответственный исполнитель инженер (А.Г. Горбуличев)
должность, подпись, инициалы, фамилия

Внесение исправлений и дополнений не допускается. Изменения и дополнения оформляются отдельным документом, оформленным в установленном порядке. Частичная перепечатка протокола без разрешения ИЦ запрещена.

Информационное письмо
«Об опытной эксплуатации полимерного кронштейна»



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СЛУЖБА ЭЛЕКТРИФИКАЦИИ И
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ул. Вокзальная, 21
г. Екатеринбург, 620107,
Тел.: (343) 358-48-23, факс: (343) 380-16-22,
E-mail: ES@svrw.rzd

Начальнику Свердловской
дистанции электроснабжения
В.В. Гладкову

«22» 06 2015 г. № исх 1210 / СВДИ Э

Об опытной эксплуатации кронштейна

Уважаемый Владимир Владимирович!

На основании пункта 7 Поручения по реализации рекомендаций региональной научно – практической конференции «Полигонная технология вождения поездов весом 8-9 тысяч тонн на направлении Кузбасс – Северо-Запад» главного инженера Свердловской железной дороги И.О. Набойченко, проведите эксплуатационное испытание стеклопластикового кронштейна для проводов СИП по ЭЧК-204.

Кронштейн смонтировать в срок до 26.06.2015 на фидере ПЭ в сторону Шувакиша.

Об исполнении доложить в службу электрификации и электроснабжения.

Начальник службы

О.В.Халуев

АКТ

ввода в опытную эксплуатацию полимерного кронштейна КПСИП-3

А К Т

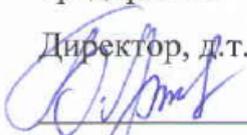
ввода в опытную эксплуатацию полимерного кронштейна КПСИП-3

от 22 июня 2015г

Мы нижеподписавшиеся, представители от ООО «Научно-производственное предприятие «ЭЛЕКТРОМАШ» и от Свердловской дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» составили акт о том, что опытный образец полимерного кронштейна КПСИП-3 передан и смонтирован для опытной эксплуатации на ВЛ 6 кВ участка Свердловской дистанции электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».

От организации исполнителя
ООО «Научно-производственное
предприятие «ЭЛЕКТРОМАШ»

Директор, д.т.н., профессор

 Б.А. Аржанников

Ответственный исполнитель

 Ю.А. Кочунов

От структурного подразделения ОАО
«РЖД»

Начальник дорожной электротехнической
лаборатории Свердловской дирекции
инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»



 И.А. Пятецкий

СПРАВКА

о практическом использовании научных результатов диссертационной работы



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИСТАНЦИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ул Стрелочников, д 39 а
Тел: (343) 358-22-14,
Факс: (343) 358-22-14

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Свердловской ди-
станции электроснабжения

 В.В. Гладков

«22» 06 2015

СПРАВКА

о практическом использовании научных результатов диссертационной работы

Результаты научных исследований Кочунова Юрия Александровича «Разработка и исследования полимерного кронштейна воздушной линии электропередачи в сетях нетяговых железнодорожных потребителей 6-10 кВ» использовались для схемных решений и конструкторской разработки полимерного кронштейна КПСИП-3 с внедрением на ВЛ 6 кВ участка Свердловской дистанции электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД».

В работе было произведено математическое моделирование механической и электрической прочности полимерного кронштейна. Проведены механические, электрические, термомеханические испытания. Определен экономический эффект по сравнению с металлическими кронштейнами.

Результаты научных исследований Кочунова Ю. А., полученные в диссертационной работе позволяют определить необходимые геометрические размеры полимерного кронштейна в соответствии с требованиями ГОСТ по механической и электрической прочности для использования на воздушных линиях электропередачи устройств СЦБ и линий продольного электроснабжения напряжением 6-10 кВ.

Начальник дорожной электротехнической
лаборатории Свердловской дирекции
инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД»



И.А. Пятецкий

АКТЫ

о проведении осмотров состояния полимерного кронштейна КПСИП-3
в опытной эксплуатации



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИСТАНЦИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ул Стрелочников, д 39 а
Тел: (343) 358-22-14,
Факс: (343) 358-22-14

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Свердловской ди-
станции электроснабжения

В.В. Гладков

2015



А К Т 1

о проведение осмотра состояния полимерного кронштейна КПСИП-3
в опытной эксплуатации

Решением службы электрификации и электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» установлен полимерный кронштейн КПСИП-3.

Опытный образец кронштейна смонтирован 22.06. 2015г на станции Шувакиш опора №80 ЛЭП – 6 кВ продольного электроснабжения с проводами СИП-3×50.

Контрольная проверка состояния произведена 27.07.2015 года. При внешнем осмотре дефектов и нарушения работоспособности не выявлено. Рекомендовано продолжить опытную эксплуатацию.

и.о. начальника ЭЧК-204



Д.В. Дерюга



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИСТАНЦИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ул Стрелочников, д 39 а
Тел: (343) 358-22-14,
Факс: (343) 358-22-14



А К Т 2

о проведение осмотра состояния полимерного кронштейна КПСИП-3
в опытной эксплуатации

Решением службы электрификации и электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» установлен полимерный кронштейн КПСИП-3.

Опытный образец кронштейна смонтирован 22.06. 2015г на станции Шувакиш опора №80 ЛЭП – 6 кВ продольного электроснабжения с проводами СИП-3×50.

Контрольная проверка состояния произведена 30.11.2015 года. При внешнем осмотре дефектов и нарушения работоспособности не выявлено. Рекомендовано продолжить опытную эксплуатацию.

и.о. начальника ЭЧК-204



Д.В. Дерюга



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИСТАНЦИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ул Стрелочников, д 39 а
Тел: (343) 358-22-14,
Факс: (343) 358-22-14

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Свердловской ди-
станции электроснабжения

В.В. Гладков



2016

А К Т 3

о проведение осмотра состояния полимерного кронштейна КПСИП-3
в опытной эксплуатации

Решением службы электрификации и электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» установлен полимерный кронштейн КПСИП-3.

Опытный образец кронштейна смонтирован 22.06. 2015г на станции Шувакиш опора №80 ЛЭП – 6 кВ продольного электроснабжения с проводами СИП-3×50.

Контрольная проверка состояния произведена 21.03.2016 года. При внешнем осмотре дефектов и нарушения работоспособности не выявлено.

По данным метеослужбы *Gismeteo*, в период с 22.06.2015 по 21.03.2016, на станции Шувакиш зафиксированы осадки в виде: дождей – 66 случая из них 3 с грозами, снега – 92 случая. Минимальная температура за рассмотренный период составила $t_{min} = -23^{\circ}\text{C}$, максимальная $t_{max} = +28^{\circ}\text{C}$. Максимальная скорость ветра – 8 м/с.

На основании выше изложенного следует, что кронштейн КПСИП-3 прошел летние дождевые и грозовые, а также зимние снежные и гололедные эксплуатационные испытания.

и.о. начальника ЭЧК-204



Д.В. Дерюга



**ФИЛИАЛ ОАО «РЖД»
ЦЕНТРАЛЬНАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИРЕКЦИЯ
ИНФРАСТРУКТУРЫ
СВЕРДЛОВСКАЯ ДИСТАНЦИЯ
ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ**

ул Стрелочников, д 39 а
Тел: (343) 358-22-14,
Факс: (343) 358-22-14

УТВЕРЖДАЮ

Начальник Свердловской ди-
станции электроснабжения

Р.Р. Алтынбаев



«30» июня 2016

А К Т 4

о проведение осмотра состояния полимерного кронштейна КПСИП-3
в опытной эксплуатации

Решением службы электрификации и электроснабжения Свердловской дирекции инфраструктуры Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД» установлен полимерный кронштейн КПСИП-3.

Опытный образец кронштейна смонтирован 22.06. 2015г на станции Шувакиш опора №80 ЛЭП – 6 кВ продольного электроснабжения с проводами СИП-3×50.

Контрольная проверка состояния произведена 22.06.2016 года. При внешнем осмотре дефектов и нарушения работоспособности не выявлено.

По данным метеослужбы *Gismeteo*, в период с 22.06.2015 по 22.06.2016, на станции Шувакиш зафиксированы осадки в виде: дождей – 90 случаев из них 6 с грозами, снега – 96 случаев. Минимальная температура за рассмотренный период составила $t_{min} = -23^{\circ}\text{C}$, максимальная $t_{max} = +33^{\circ}\text{C}$. Максимальная скорость ветра – 8 м/с (Северо-Западный).

На основании выше изложенного следует, что кронштейн КПСИП-3 прошел летние дождевые и грозовые, а также зимние снежные и гололедные эксплуатационные испытания.

начальник ЭЧК-204



Д.В. Дерюга