

На правах рукописи



Кочунов Юрий Александрович

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

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

АВТОРЕФЕРАТ

**диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**

Екатеринбург – 2016

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» (ФГБОУ ВО УрГУПС).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент

Аржанников Борис Алексеевич.

Официальные оппоненты:

Руцкий Владимир Михайлович, доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Самарский государственный университет путей сообщения», кафедра «Электрический транспорт», профессор (ФГБОУ ВО СамГУПС).

Куценко Сергей Михайлович, кандидат технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения», кафедра «Автоматика, телемеханика и связь», доцент (ФГБОУ ВО ИргУПС).

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I» (ФГБОУ ВО ПГУПС).

Защита состоится « 17 » февраля 2017 г. в 14–00 на заседании диссертационного совета Д 218.013.01 на базе Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения» по адресу: 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова 66, ауд. Б2-15 – зал диссертационных советов.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Уральский государственный университет путей сообщения». Адрес сайта, на котором размещена диссертация и автореферат: <http://www.usurt.ru>.

Автореферат разослан «_____» декабря 2016 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Тимухина Елена Николаевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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

Объект исследования: совершенствование конструкций устройств электроснабжение железных дорог.

Область исследования: улучшение эксплуатационных показателей устройств электроснабжения и энергоснабжение нетяговых железнодорожных потребителей

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. Руцкого, 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 конструкции полимерного кронштейна, которая отвечает нормативным и эксплуатационным требованиям.

Задачи исследования:

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

2. 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.

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

4. На основании выполненных исследований разработана рабочая документация, по которой изготовлен опытный образец, находящийся в опытной эксплуатации.

5. Поддерживающие конструкции, разработанные по результатам диссертационной работы, могут быть использованы при строительстве новых и модернизации существующих воз-

душных линий электропередачи напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. Применение полимерных кронштейнов позволит сократить количество отказов с 10 до 4 % от общего числа нарушений нормальной работы устройств СЦБ и ПЭ, и перейти к обслуживанию воздушных линий по техническому состоянию, что приведет к снижению капитальных и эксплуатационных расходов хозяйств электрификации и электроснабжения – филиалов ОАО «РЖД».

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 результатами многочисленных экспериментов, а также внедрением полимерного кронштейна 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 экспериментальных 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, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, и 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Введение содержит актуальность темы исследования, объект и область исследования, степень разработанности, цель и задачи работы, научную новизну, теоретическую и практическую значимость работы, методологию и методы исследования, положения, выносимые на защиту, степень достоверности и апробацию результатов, реализацию и внедрение результатов работы, публикации, структуру и объем диссертации.

В первой главе дана сравнительная характеристика поддерживающих конструкций, которые представляют собой комплекс устройств, включающий в себя: кронштейн, изоляторы,

вязки проводов, армирующие элементы. На основании ежегодного анализа 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, по которому определено, что ежегодно отказы кронштейнов 2,7 % и изоляторов 7,2 % составляют 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. 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). По проведенным теоретическим исследованиям определены наиболее слабые по прочности элементы поддерживающих конструкций, и рассчитаны величины нагрузок, при которых происходит их разрушение. 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 до 4 % от общего числа.

Проведен обзор применения полимерных материалов на зарубежных и отечественных электрифицированных железных дорогах. Рассмотрены свойства и характеристики полимерных материалов. На основании теоретических и практических исследований определено, что стеклопластик профильный электроизоляционный СПП-ЭИ(Н), обладающий необходимыми электромеханическими свойствами, может быть использован для изготовления поддерживающих конструкций воздушных ЛЭП напряжением 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ. СПП-ЭИ(Н) не подвержен влиянию ультрафиолета, обладает низкой абсорбцией влаги, что гарантирует изготовитель на основании технических условий (ТУ 2296-009-37925603-2013 «Стеклопластики профильные электроизоляционные»), зарегистрированных Росстандартом № 070/013460 от 19.12.12 (ФБУ «УРАЛТЕСТ»). ТУ отвечают требованиям ГОСТ по каждому показателю, приведенному в них.

По результатам проведенных теоретических и практических исследований получен патент на полезную модель полимерного кронштейна. В модели кронштейн не имеет изоляторов, т. к. 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). Таким образом, полимерный крон-

штейн может рассматриваться как комплексная поддерживающая конструкция, включающая в себя механические и электрические составляющие. Крепление кронштейна к опоре осуществляется в двух исполнениях – с тягой и с подкосом.

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

1. Механическая прочность полимерного кронштейна будет обеспечена при соблюдении условий:

– эквивалентное динамическое напряжение не должно превышать соотношения $\sigma_{\text{эквд}} \leq \sigma_{\text{доп}}$ (МПа) в соответствии с ГОСТ;

– прогиб сжато-изогнутых элементов δ (мм) не должен превышать соотношения $1/150$ длины элемента в соответствии с СТН ЦЭ 141.

2. Электрическая прочность полимерного кронштейна будет обеспечена при соблюдении условий:

– 50 %-ное разрядное напряжение не должно превышать нормируемых допустимых значений в соответствии с ГОСТ и ПУЭ-7;

– удельная поверхностная проводимость соответствующей зоны загрязнения не должна превышать нормируемых допустимых значений в соответствии с ГОСТ и иных нормативных документов;

– кронштейн должен быть стойким к воздействию импульсного напряжения с крутым фронтом (грозовому перенапряжению), крутизна фронта импульса должна быть не менее 1000 кВ/мкс в соответствии с ГОСТ.

3. Полимерный кронштейн должен отвечать требованиям термомеханической прочности в соответствии с ГОСТ. 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.

Вторая глава посвящена разработке методик расчета механической и электрической прочности полимерного кронштейна.

Методика расчета механической прочности полимерного кронштейна основана на методе начальных параметров и позволяет при изменении диаметра траверсы, длины межфазных расстояний определить эквивалентное динамическое напряжение и прогиб, а также произвести сравнение полученных величин с граничными значениями и описывается в следующей последовательности:

1. Задаются граничные (нормативные) и начальные значения. К начальным значениям 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. Устанавливаются 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 . Рассмотренные диапазоны нагрузок соответствуют применению самонесущих изолированных проводов сечением токопроводящей жилы от 50 мм^2 до 120 мм^2 в гололедных районах до 5 (толщина стенки гололеда 25 мм) включительно, при одновременном воздействии ветровых нагрузок до 36 м/с включительно, что соответствует 5 ветровому району на основании ЦЭ-713.

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.

Используя предложенную методику, определено, что механическая прочность полимерного кронштейна с одной тягой будет обеспечена в диапазоне приложения сил тяжести проводов $G_i = 2,0 \div 2,5$ кН и аэродинамической силы $F_{rw} = 30 \div 100 \%$ от G_i , при этом диаметр траверсы составляет $d = 64$ мм. Применение данного диаметра не желательно с точки зрения электрической прочности, так как удельная поверхностная проводимость пропорционально увеличивается с увеличением диаметра траверсы. Потому для обеспечения механической прочности полимерного кронштейна диаметр траверсы принят $d = 46$ мм, но с использованием двух тяг $d = 25$ мм, в такой композиции прочность обеспечена при $G_i = 2,0 \div 3,0$ кН и аэродинамической силы $F_{rw} = 30 \div 100 \%$ от G_i . Сопоставление методики расчета механической прочности полимерного кронштейна произведено на основании сравнения ее результатов с данными, полученными при моделировании в программе «POLUS v.2.1.1», а именно с максимальным изгибающим моментом, реакциями в сечениях траверсы и тяги. Сходимость результатов при определении прогиба составляет 10 %, эквивалентного динамического напряжения 0,1 %. Таким образом, можно утверждать, что предложенная методика является достаточно точной.

В соответствии с ПУЭ-7 выбор полимерных изоляторов или конструкций в зависимости от степени загрязнения (СЗ) и номинального напряжения электроустановки должен производиться по разрядным характеристикам в загрязненном и увлажненном состоянии. При этом изоляционная часть полимерного кронштейна, находящаяся под межфазным напряжением, должна иметь 50 %-ные разрядные напряжения (электрическую прочность) промышленной частоты в загрязненном и увлажненном состоянии не ниже 23 кВ при $U_{л} = 10$ кВ. 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.

Определение области применения изоляционных конструкций в районах, различных по степени их загрязнения, предлагается производить по следующей методике:

1. Определяется зависимость электрической прочности (разрядного напряжения $U_{в.р.}$) рассматриваемой изоляционной конструкции от степени её загрязнения (удельной поверхностной проводимости χ) $U_{в.р.} = f(\chi)$. Эта зависимость может быть определена с использованием наиболее подходящей, для рассматриваемой изоляционной конструкции, математической модели перекрытия загрязненного и увлажненного гладкостержневого изолятора в виде

$$U_{в.р.} = \frac{L A^{\frac{1}{1+n}}}{(\chi \pi D)^{\frac{n}{1+n}}}, \quad (1)$$

где L – длина пути утечки тока по поверхности гладкостержневого изолятора, см; D – диаметр гладкостержневого изолятора, см; χ – удельная поверхностная проводимость, мкСм; A и n – коэффициенты для быстро удлиняющейся дуги.

Модель позволяет исследовать электрическую прочность гладкостержневого изолятора в зависимости от его геометрических параметров (длины и диаметра), степени загрязнения и характеристик дуги при перекрытии изолятора. Используя научные исследования В. М. Руцкого, зависимость $U_{в.р.} = f(\chi)$ определяется 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.

2. В тех же координатах на графике $U_{в.р.} = f(\chi)$ строится прямая, соответствующая нормируемому в ПУЭ 50 %-ному разрядному напряжению.

3. Слева от точки пересечения этих линий располагается область, где электрическая прочность рассматриваемой изоляционной конструкции не меньше нормируемой в ПУЭ, то есть искомая область 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 1). Длины $L_{мф}$ вы-

браны в соответствии с СП 226.1326000.2014 «Электроснабжение нетяговых потребителей. Правила проектирования, строительства и реконструкции».

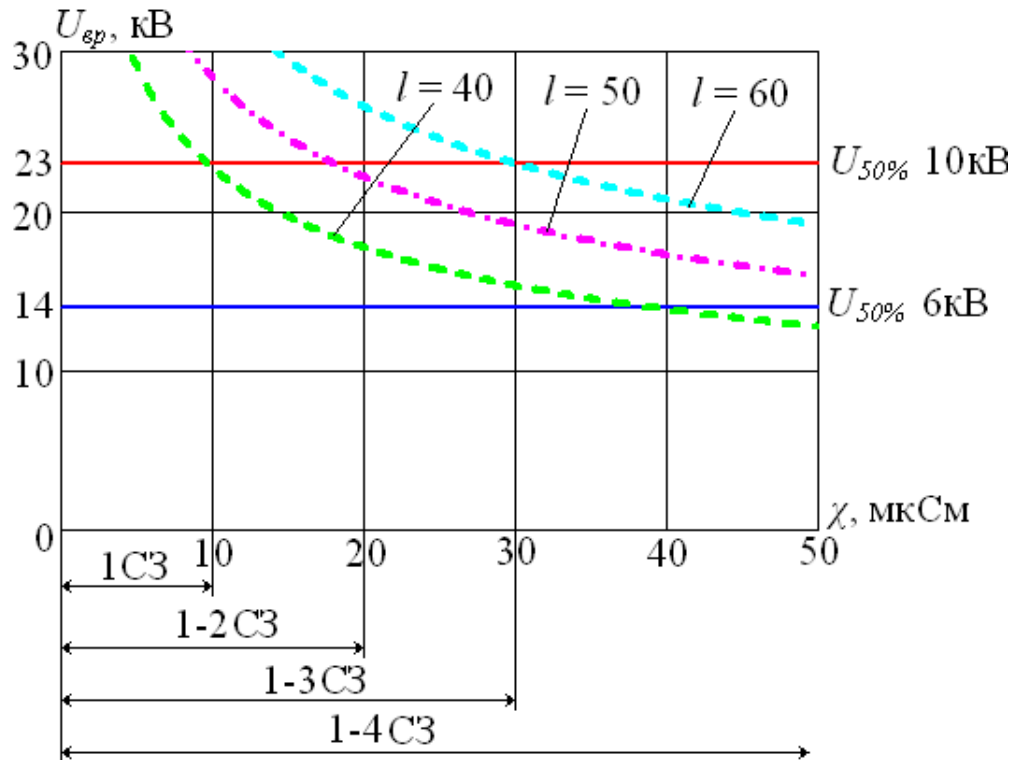


Рисунок 1 – Определение области применения полимерного кронштейна для ВЛЭП 6–10 кВ

Допущение: в модели не учитываются высокие гидрофобные качества защитной оболочки гладкостержневой полимерной траверсы, кроме того, по формуле (1) рассчитывается нижняя граница 50 %-ного разрядного напряжения, что позволяет рассчитывать на более высокие разрядные характеристики, чем полученные по формуле (1).

Из полученных результатов (рисунок 1) следует, что полимерный кронштейн с гладкостержневой траверсой диаметром 4,6 см, с длиной межфазного расстояния $L_{мф} = 40$ см будет обеспечивать электрическую прочность только для ВЛ 6 кВ с 1 по 3 зону степени загрязнения, при этом для ВЛ 10 кВ электрическая прочность обеспечена только для 1 зоны СЗ. Увеличив $L_{мф}$ до 50 см, область применения полимерного кронштейна для ВЛ 6 кВ находится в пределах 1–4 зон СЗ, ВЛ 10 кВ – 1–2 зон степени загрязнения. При длине межфазного расстояния 60 см электрическая прочность для ВЛ 6 кВ также обеспечена с 1 по 4 зону СЗ, а для ВЛ 10 кВ – с 1 по 3 зону степени загрязнения. Исходя из расчетов механической прочности, определено, что рациональной длиной межфазного расстояния следует принять $L_{мф} = 50$ см.

Разрабатываемая методика оценки численных значений удельной поверхностной проводимости описывается в следующей последовательности. Задаются исходные данные $U_{л}$, h и χ_{ν} . В программе моделирования мультифизических процессов *Comsol Multiphysics* создается трехмерная геометрия для трех типов изоляции (ПС-70Е; ШФ-20Г; КПСИП-3).

Для изоляционных конструкций, на соответствующих гранях, задаются граничные условия фазных напряжений: у изоляторов однофазное $U_0(t) = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$, у полимерного кронштейна напряжение задается со смещением относительно фаз: $U_A(t) = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t)$; $U_B(t) = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$; $U_C(t) = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} \cdot \sqrt{2} \cdot \sin(\omega t - \varphi)$. Определение поверхностного тока утечки и распределение электрического потенциала по поверхности производится в модуле *Current Conservation*, где решается оболочная конечно-элементная модель, описываемая следующей системой уравнений:

$$\begin{cases} \nabla \cdot J = 0 \\ J = (\sigma + \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{d}{dt}) \cdot E, \\ E = -\nabla U \end{cases} \quad (2)$$

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.

В модуле *Results* определены величины поверхностных токов путем интегрирования плотности тока по соответствующей границе. Полученные на изоляторах токи носят синусоидальный характер. По участку траверсы кронштейна КПСИП-3 между узлами крепления проводов протекают межфазные токи утечки, вызванные проводимостью слоя загрязнения и имеющие несинусоидальный характер. По тягам кронштейна протекают чрезмерно малые токи, поэтому проводимостью слоя загрязнения на тягах можно пренебречь. На основании полученных данных определен эффективный ток для каждого типа изоляции, у кронштейна КПСИП-3 максимальный эффективный ток протекает по центральной (второй) фазе. По полученным величинам тока и известном напряжении, используя закон Ома, определена удельная поверхностная проводимость изоляционных конструкций для разных зон загрязнения. По результатам расчета оценки численных значений удельной поверхностной проводимости производится вероятностная оценка $P(\chi)$ работоспособности изоляционных конструкций в различных зонах загрязнения. В общем виде вероятность $P(\chi)$ записывается как интегральная функция распределения $F(h)$

$$F(h) = \int_{h_{\text{min}}}^{h_r} q(h) dh, \quad (3)$$

где h_{\min} и h_r – соответственно минимальная и ограничивающая толщина слоя загрязнения определенной зоны, мм.

Функция плотности распределения $q(h)$ описывается распределением Вейбулла, 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.

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

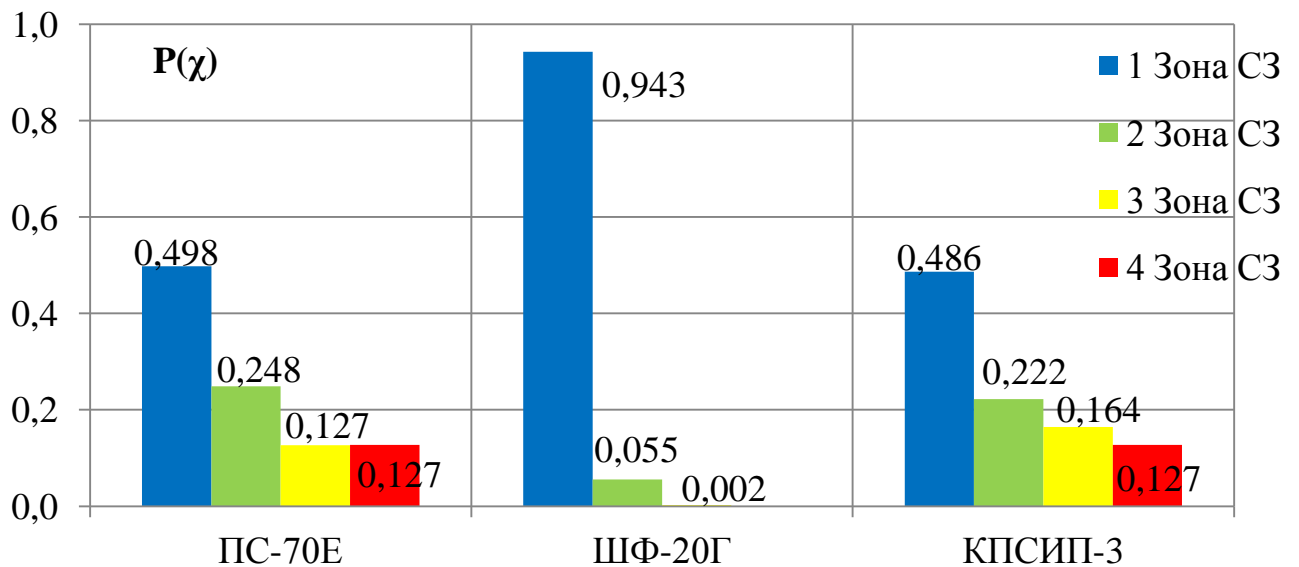


Рисунок 2 – Вероятностная оценка $P(\chi)$ работоспособности изоляционных конструкций в различных зонах степени загрязнения

По проведенным исследованиям определено, что полимерный кронштейн с двумя тягами по своим характеристикам сопоставим со стеклянным изолятором, рекомендованном ПУЭ для эксплуатации в 1 и 2 зонах СЗ. Таким образом, кронштейн также будет работать в 1 и 2 зонах степени загрязнения, что подтверждает сходимость результатов с математическим моделированием гладкостержневого изолятора.

По упрощенной методике оценки числа отключений ВЛ 6–10 кВ из-за грозových перенапряжений, определена вероятность перекрытия $P(I_M)$ изоляторов (ПС-70Е и ШФ-20Г) и полимерного кронштейна КПСИП-3, которая рассчитывается по экспоненциальному закону распределения первых импульсов тока разрядов молнии (4), при этом у полимерного кронштейна I_M определена опытным путем.

$$P(I_M) = \exp(-0,04I_M). \quad (4)$$

Вероятность перекрытия изоляции полимерного кронштейна составила 0,712, что на 12 % меньше, чем у рассматриваемых изоляторов.

Третья глава посвящена экспериментальным исследованиям и эксплуатационным испытаниям.

Создание полимерного кронштейна для воздушной ЛЭП 6–10 кВ устройств СЦБ и ПЭ и ввод его в эксплуатацию в общем случае описывается алгоритмом, представленном на рисунке 3.

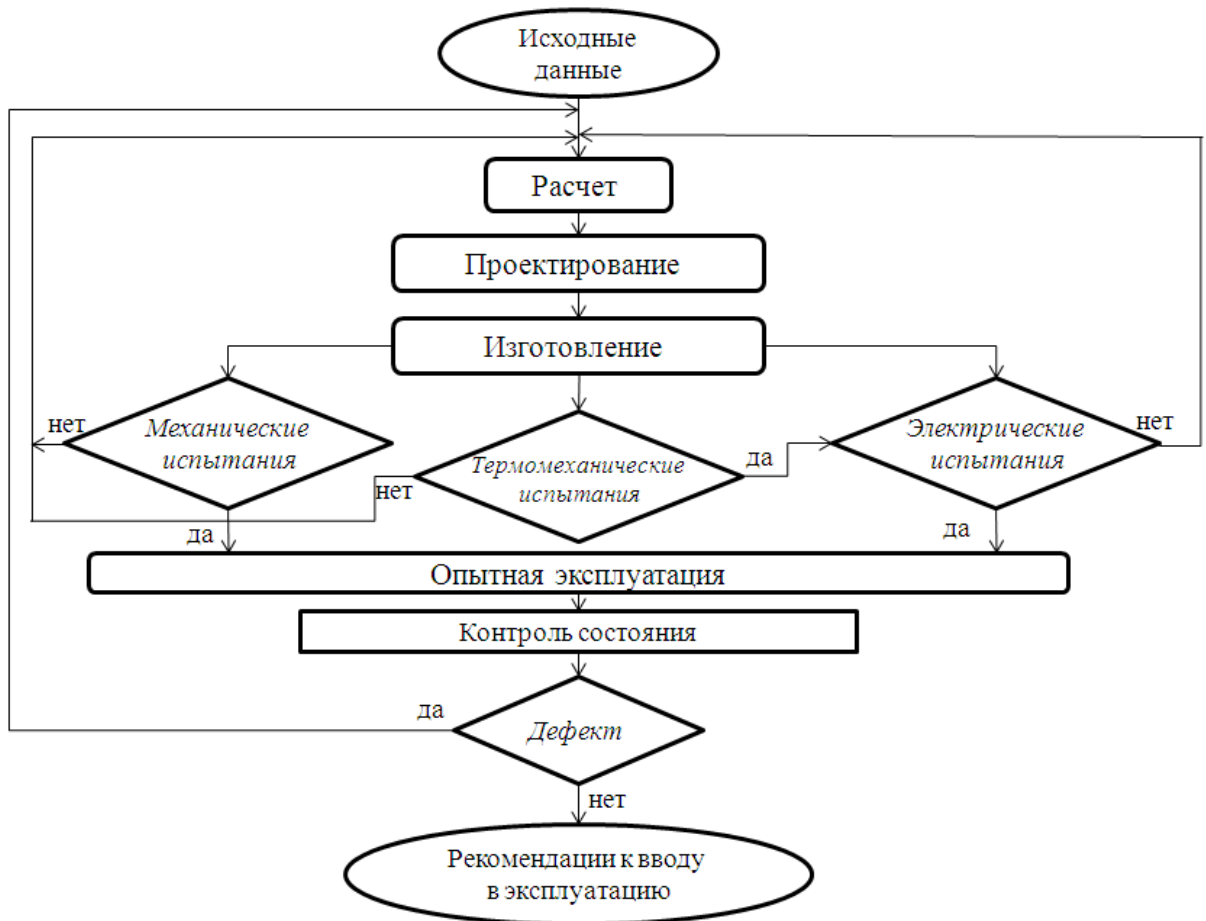


Рисунок 3 – Алгоритм разработки полимерного кронштейна

На основании проведенных теоретических исследований научно-исследовательским институтом транспортного строительства ОАО «ЦНИИС» разработана рабочая документация РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов», в которой представлен кронштейн (рисунок 4) для самонесущих изолированных проводов с двумя тягами – КПСИП-3. На рисунке 4 показаны: 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. 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». По рабочей документации изготовлена опытная партия полимерных кронштейнов серии СИП. Экспериментальные исследования проведены в соответствии с разработанными программами испытаний.

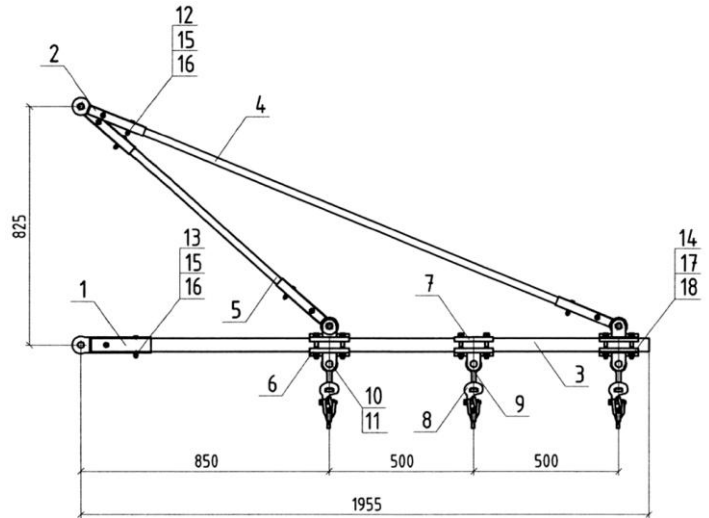


Рисунок 4 – Полимерный кронштейн КПСИП-3

Механические испытания проведены в испытательном центре «ЦНИИС-ЭлЖТ»

ОАО ЦНИИС, полимерный кронштейн КПСИП-3 соответствует требованиям по прогибу.

Исследования электрической прочности полимерного кронштейна проведены в испытательном центре «ИЦ ТСЖТ УрГУПС». Экспериментально определена зависимость (см. рисунок 1) разрядного напряжения $U_{в.р.}$ от степени загрязнения (удельной поверхностной проводимости χ), на основании которой следует, что кронштейн КПСИП-3 без защитной оболочки соответствует требованиям электрической прочности для 1 и 2 зон степени загрязнения, с применением защитной оболочки Виксинт ПК-68 (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) изоляционные качества стеклопластика СПП-ЭИ(Н) повышаются, что позволяет расширить зоны применения полимерного кронштейна с 1 по 4 зону загрязнения.

Термомеханические испытания проведены в испытательном центре технических средств железнодорожного транспорта «ИЦ ТСЖТ УрГУПС», по результатам которых полимерный кронштейн КПСИП-3 выдержал испытания. При термомеханических испытаниях, опытным путем определены перемещения нагруженной траверсы при изменении температурных режимов Δh составляет не более 0,01725 мм, что не влияет на соотношение 1/150, а также, в ходе последующих, электрических испытаниях, определена величина импульсного напряжения, которая составила $U = 180$ кВ.

По проведенным теоретическим и практическим исследованиям полимерный кронштейн КПСИП-3 рекомендован к опытной эксплуатации. Опытный образец полимерного кронштейна КПСИП-3 смонтирован для опытной эксплуатации 22.06.2015 г. на опоре № 80 ВЛ 6 кВ станции Шувакиш участка Свердловской дистанции электроснабжения Свердловской дирекции ин-

фраструктуры – структурного подразделения Центральной дирекции инфраструктуры – филиала ОАО «РЖД». В период с 22.06.2015 г. по 22.06.2016 г. проведены четыре осмотра технического состояния полимерного кронштейна в опытной эксплуатации, по итогам которых дефектов и нарушения работоспособности не выявлено. По данным метеослужбы *Gismeteo*, за отчетный на станции Шувакиш зафиксированы осадки в виде: дождей – 90 случаев из них 6 с грозами, снега – 96 случаев. Минимальная температура составила $t_{\min} = -23$ °С, максимальная $t_{\max} = +33$ °С, максимальная скорость ветра – 8 м/с. На основании вышеизложенного следует, что кронштейн КПСИП-3 прошел летние дождевые и грозовые, а также зимние снежные и гололедные эксплуатационные испытания.

В четвертой главе определена технико-экономическая эффективность применения полимерного кронштейна. На основании методики оценки экономической эффективности инвестиций и инноваций на железнодорожном транспорте выполнен расчет приведенных строительно-эксплуатационных затрат на металлические кронштейны (с изоляторами) и на полимерный кронштейн КПСИП-3 за период 10 лет. Расчет произведен на 1 км воздушной линии (15 кронштейнов). Приведенные строительно-эксплуатационные затраты по типам кронштейнов составили: КВЛЦ-50 – 481742 руб., СИП-3п – 413602 руб., СИП-3 – 374602 руб., М-2 – 517807 руб., КПСИП-3 – 107391 руб. Экономический эффект при внедрении и эксплуатации полимерного кронштейна, относительно металлических кронштейнов, за период 10 лет составляет: КВЛЦ-50 – 374351 руб., СИП-3п – 306211 руб., СИП-3 – 267211 руб., М-2 – 410416 руб.

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 ($d = 46$ мм) и тяг ($d = 25$ мм), фазное ($l_{\phi} = 850$ мм) и межфазные расстояния ($l_{\text{мф}} = 500$ мм), точки крепления тяг к траверсе ($l_{\text{T1}} = 850$ мм; $l_{\text{T2}} = 1850$ мм) позволяющие обеспечить механическую прочность полимерного кронштейна при изменении статических и динамических нагрузок.

4. Сформулированы направления анализа электрической прочности полимерного кронштейна, по методике определения области применения изоляционных конструкций в районах, различных по степени их загрязнения, получены значения 50 %-ного разрядного напряжения в зависимости от степени загрязнения, на основании которых 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. Разработана методика определения численные значения удельной поверхностной проводимости, дана вероятностная оценка работоспособности полимерного кронштейна в различных районах степени загрязнения, определено, что при напряжении 10 кВ полимерный кронштейн может быть использован в 1 и 2 зонах степени загрязнения.

6. Определена вероятность перекрытия линейной изоляции разрядом молнии, у полимерного кронштейна $P(I_M)$ составила 0,712, что на 12 % меньше, чем у применяемых в эксплуатации изоляторов ПС-70Е и ШФ-20Г.

7. На основании выполненных исследований выполнена и утверждена разработана рабочая документация РД № 3320 «Кронштейны из полимерных материалов», по которой изготовлена опытная партия кронштейнов. 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.

8. 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 работ, опубликованных автором по теме диссертации:

1. 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. – Входит в перечень ВАК.

2. Кочунов, Ю. А. Аналитическое определение прочности стеклопластикового кронштейна проводов для линий продольного электроснабжения / Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2014. – № 3 (42). – С. 102–108. – ISSN 1815-9400. – Входит в перечень ВАК.

3. Кочунов, Ю. А. Техничко-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. – Входит в перечень ВАК.

4. Кочунов, Ю. А. Определение поверхностной проводимости загрязненной изоляции / А. А. Пышкин, А. В. Паранин, Ю. А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2015. – № 4 (47). – С. 91–95. – ISSN 1815-9400. – Входит в перечень ВАК.

5. 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. – Входит в перечень ВАК.

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

7. Кочунов, Ю. А. Электрические испытания полимерного кронштейна / А.П. Сухогузов, Н.Л. Иванов, Ю.А. Кочунов // Транспорт Урала. – 2016. – №2 (49). – С. 119–123. – ISSN 1815-9400. – Входит в перечень ВАК.

8. Пат. РФ № 133360 на полезную модель, МПК H02G 7/20. Устройство крепления проводов линии электропередачи к опоре / Аржанников Б. А., Аминев Р. Н., Кочунов Ю. А. – 2013129108/07; заявл. 25.06.2013; Опубл. 10.10.2013, Бюл. № 28. – 4 с.: ил.

КОЧУНОВ ЮРИЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

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

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

Подписано в печать « 9 » декабря 2016.

Формат 60 x 84 1/16.

Усл. печ. л. 1,1.

Тираж 100 экз.

Заказ 263.

УрГУПС, 620034, г. Екатеринбург, ул. Колмогорова, 66