

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ «НАЦИОНАЛЬНЫЙ
ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ «МИСиС»

На правах рукописи

КУТЕПОВ Антон Григорьевич

**ОБОСНОВАНИЕ УСЛОВИЙ И РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО
ПОВЫШЕНИЮ УРОВНЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В ПОДЗЕМНЫХ
ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ ГОРНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (в горной промышленности)»

Диссертация

на соискание ученой степени кандидата технических наук

Научный руководитель – докт. техн. наук, профессор Ляхомский А. В.

Москва – 2019 г.

Оглавление

Введение	6
Глава 1. Современное состояние электробезопасности на горных предприятиях и обоснование задач исследования	10
1.1. Общие положения	10
1.2. Обзор исследований вопросов электробезопасности	10
1.3. Электротравматизм на горных предприятиях	17
1.3.1. Исходные положения	17
1.3.2. Динамика электротравматизма	21
1.3.3. Электротравматизм в угольной промышленности	22
1.3.4. Электротравматизм в горнорудной и нерудной промышленности	25
1.3.5. Причины электротравматизма в горной промышленности	28
1.4. Обоснование и постановка задач диссертационного исследования	31
Глава 2. Методика исследования электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий	35
2.1. Методические принципы исследования электробезопасности	35
2.2. Методика исследования параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий	39
2.2.1. Определение статистических характеристик параметров изоляции	39
2.2.2. Моделирование вероятностных законов распределения параметров изоляции	42
2.3. Методика исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий	48
2.3.1. Исследование условий электробезопасности при прикосновении к токоведущим частям электроустановок	48
2.3.2. Исследование условий электробезопасности при прикосновении к	59

нетоковедущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением..	59
2.4. Выводы	62
Глава 3. Исследование состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий.....	64
3.1. Исходные положения.....	64
3.2. Статистические характеристики параметров изоляции подземных электрических сетей.....	67
3.2.1. Статистические характеристики параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт.....	67
3.2.2. Статистические характеристики параметров изоляции подземных электрических сетей рудников	75
3.3. Вероятностные законы распределения параметров изоляции подземных сетей.....	83
3.3.1. Исходные положения.....	83
3.3.2. Вероятностные законы распределения параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт.....	84
3.3.3. Вероятностные законы распределения параметров изоляции рудничных электрических сетей.....	95
3.4. Выводы	104
Глава 4. Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.....	106
4.1. Исходные положения.....	106
4.2. Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт.....	107
4.3. Исследование условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях.....	119

4.4. Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников при косвенном прикосновении	129
4.5. Выводы	130
Глава 5. Разработка рекомендаций по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий	134
5.1. Исходные положения.....	134
5.2. Рекомендации по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий	134
5.2.1. Алгоритм оценки условий электробезопасности	134
5.2.2. Реализация алгоритма оценки условий электробезопасности в программной среде Microsoft Office Excel	145
5.4. Выводы	155
Заключение.....	157
Список литературы.....	159
Приложение А. Интервальные вариационные ряды активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости шахтных электрических сетей	171
Приложение Б. Интервальные вариационные ряды активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости рудничных электрических сетей	180
Приложение В. Графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт	184
Приложение Г. Графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного	

**сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей
относительно земли рудников 190**

**Приложение Д. Области условий электробезопасности, обусловленные
зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции
подземных электрических сетей угольных шахт 193**

**Приложение Е. Области условий электробезопасности, обусловленные
зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции
подземных электрических сетей рудников 196**

Введение

Актуальность работы. В настоящее время в горной промышленности неуклонно растет количество используемого электрооборудования, растет мощность подключаемых электроприемников. Это требует серьезной работы по предупреждению и предотвращению возникновения опасных режимов эксплуатации.

Задача обеспечения электробезопасности на горных предприятиях остается актуальной, в связи с тем, что уровень электротравматизма продолжает оставаться высоким, несмотря на ужесточение требований нормативных технических документов, разработку и внедрение новых более совершенных способов и средств защиты от поражения электрическим током.

Объектом исследования диссертационной работы является электробезопасность в подземных электрических сетях предприятий горной промышленности.

Предметом исследования являются вероятностные свойства параметров изоляции и условия электробезопасности в подземных электрических сетях предприятий горной промышленности.

Идея работы заключается в повышении электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий за счет установления устойчивых уровней и предельных значений полного и активного сопротивлений изоляции с учетом их вероятностного характера, обеспечивающих условия электробезопасности.

Цель работы заключается в исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий и разработке рекомендаций по повышению уровня электробезопасности.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе поставлены и решены следующие **задачи**:

1. Обосновать и разработать методические принципы и методики исследования параметров изоляции и условий электробезопасности в подземных

электрических сетях с учетом вероятностного подхода, обеспечивающего более адекватное представление о процессе обеспечения электробезопасности.

2. Исследовать состояние изоляции подземных электрических сетей с определением статистических характеристик и установлением вероятностных законов распределения полного, активного, емкостного сопротивлений, а также емкости сети относительно земли.

3. Исследовать условия электробезопасности в подземных сетях с установлением вероятностных уровней параметров изоляции, обеспечивающих предельно безопасные токи через человека.

4. Разработать рекомендации по обоснованию условий и повышению уровня электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

Методология и методы диссертационного исследования. Исследования выполнены с использованием методов теории электрических цепей, теории электроснабжения промышленных предприятий, теории электробезопасности, теории вероятностей, теории математической статистики. При определении статистических характеристик, законов распределения вероятностей параметров изоляции, установлении устойчивых уровней и вероятностных областей условий обеспечения электробезопасности использовались программные пакеты Statistica, Microsoft Office Excel.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов, рекомендаций обеспечивается научно-обоснованной постановкой задач исследования, корректным применением современных методов вероятностного и статистического моделирования и подтверждается адекватностью результатов исследования.

Основные научные положения, выносимые на защиту, и их новизна:

1. Распределения вероятностей параметров изоляции и емкости относительно земли подземных электрических сетей угольных шахт и рудников, соответствующих логнормальному и гамма-закону.

2. Зависимость емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников от активного сопротивления изоляции с высокой статистической значимостью и математической точностью аппроксимации описывается линейной функцией.

3. Величину тока через человека при прикосновении к токоведущим частям следует определять с учетом установленной зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей.

4. Вероятностные области обеспечения условий электробезопасности, полученные на основании законов распределения вероятностей полного и активного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников, следует определять с учетом их минимальных значений по условиям электропоражения.

Вышеизложенные научные положения диссертационной работы, выносимые на защиту, получены впервые.

Теоретическая и практическая значимость работы:

1. Разработаны методические принципы и методика исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий с учетом вероятностного характера параметров изоляции.

2. Установлены вероятностные законы распределения параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей.

3. Установлены зависимости емкостного сопротивления изоляции от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей.

4. Установлено выражение для тока через человека, учитывающее зависимость емкостного сопротивления изоляции от активного сопротивления изоляции.

5. Получена оценка состояния электротравматизма на предприятиях основных горнодобывающих отраслей.

6. Получены оценки параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий как случайных величин.

7. Установлены устойчивые уровни обеспечения электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников.

8. Разработаны рекомендации по оценке условий и повышению уровня электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

Реализация работы. Методические рекомендации по оценке условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий приняты к рассмотрению АО «Научный центр ВостНИИ по промышленной и экологической безопасности в горной отрасли» для реализации в нормативной базе.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2012» (г. Москва, 2012 г.), Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2013» (г. Москва, 2013 г.), Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2015» (г. Москва, 2015 г.), Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2016» (г. Москва, 2016 г.), Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2018» (г. Москва, 2018 г.), Международном научном симпозиуме «Неделя горняка – 2019» (г. Москва, 2019 г.).

Публикации. Основные положения работы опубликованы в 3 статьях в журналах, входящих в Перечень рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, заключения, библиографического списка, включающего 112 наименований, 6 приложений. Общий объем работы 197 стр., из которых 158 стр. основного текста, включая 27 рисунков, 52 таблицы.

Глава 1. Современное состояние электробезопасности на горных предприятиях и обоснование задач исследования

1.1. Общие положения

Горнодобывающая промышленность характеризуется высокой энерго- и трудоемкостью технологических процессов и занимает особое место среди других отраслей промышленности в связи с особыми специфическими условиями производства, оказывающими влияние на состояние производственного травматизма, в том числе электротравматизма. Особые условия горного производства, особенно при подземной разработке месторождений полезных ископаемых, достаточно многочисленны и среди них наиболее важны микроклимат, освещенность, шум и вибрация, трудные условия горных работ.

Задача обеспечения электробезопасности на горных предприятиях остается актуальной, в связи с тем, что уровень электротравматизма продолжает оставаться высоким, несмотря на ужесточение требований нормативных технических документов, разработку и внедрение новых более совершенных способов и средств защиты от поражения электрическим током.

В этой связи целесообразно провести обзор исследований вопросов электробезопасности.

1.2. Обзор исследований вопросов электробезопасности

Вопросы, связанные с исследованием электробезопасности на промышленных предприятиях, в том числе на предприятиях горной отрасли, являются постоянным предметом научных исследований. Электротравматизм характеризуется высокой долей летальных электротравм в общем числе электротравм, в связи с чем занимает особое место в промышленной безопасности. Несмотря на снижение количества электротравм, уровень электротравматизма остается достаточно высоким, что требует проведения дополнительных исследований в предметной области электробезопасности.

Исследования в области электробезопасности начали проводиться, начиная со времени широкого применения электрического тока, как в быту, так и в промышленности, в том числе горной промышленности. Начиная с 40-х годов 20-го века, вводятся нормативно-технические документы, регламентирующие устройство и безопасную эксплуатацию электрических установок и сетей. Разработке правил и норм во многом способствовали исследования как отечественных, так и зарубежных ученых.

Сопротивление тела человека является одним из важнейших параметров, который необходимо учитывать при исследовании условий электробезопасности. Параметры тела человека, как объекта поражения, исследовались многими учеными, в числе которых Л. В. Гладилин, В. И. Щуцкий, В. Е. Манойлов и др. [27, 31, 40, 69, 73, 94, 100, 106 и др.].

В работах Л. В. Гладилина, В. И. Щуцкого и др. [100, 106] приводятся обобщенные результаты исследований отечественных и зарубежных ученых о влиянии электрического тока на организм человека, а также величины критических значений токов в зависимости от частоты и напряжения питающей сети, рода электрического тока и пути его протекания через тело человека. Для кратковременного режима воздействия электрического тока приведены его пороговые значения, а также величины сопротивления тела человека и напряжения прикосновения в зависимости от времени воздействия и видов тока. Указанные исследования позволили создать нормативную базу ГОСТ 12.1.038-82 «Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов» [21], в которой закреплены допустимые значения напряжения прикосновения и тока через человека от времени воздействия тока, как для нормального, так и для аварийного режимов эксплуатации электроустановок.

В работе Ю. С. Рубана [69] разработана и представлена методика количественной оценки состояния электробезопасности с учетом функционального состояния оператора.

В исследованиях В. В. Кацай [31] рассматривается влияние шума электрооборудования на электротехнические характеристики тела человека, приводятся зависимости электрического сопротивления тела человека от характера, уровня и частоты шума. Исследования в указанном вопросе получили развитие в работах Е. В. Зыкиной [27, 73], в которых изложена методика и приведены результаты исследования пороговых ощутимых токов при одновременном воздействии на человека электрического тока и шума.

Защитное заземление является достаточно эффективным способом защиты человека от поражения электрическим током. Расчет заземляющих устройств стал классической областью исследований. Этому способствовали работы отечественных ученых, таких как: Л. В. Гладилин, В. И. Щуцкий, А. И. Сидоров, Ю. Г. Бацежев, Н. И. Чеботаев, В. В. Бургсдорф, А. И. Якобс, В. Е. Манойлов и др. [12, 40, 90, 91, 97, 105, 106 и др.].

В работе Т. А. Чепайкиной [91] приведена уточненная методика расчета заземляющих устройств, исходя из обеспечения безопасного напряжения прикосновения, и разработан комплекс организационно-технических мероприятий, повышающих электробезопасность на угольных предприятиях, расположенных в зоне вечной мерзлоты.

В работах В. В. Бургсдорфа, А. И. Якобса, А. Г. Машкина, В. И. Щуцкого, Н. И. Волощенко, Л. А. Плащанского., Л. В. Гладилина, Ю. Г. Бацежева, Н. И. Чеботаева [12, 40, 97, 106] изложены основы теории режимов работы заземлителей, методы расчета, проектирования, сооружения и эксплуатационного контроля заземляющих устройств, основы нормирования их параметров. Основные результаты указанных исследований отражены в нормативных документах: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ [9, 30], в которых закреплены положения по устройству, расчету, нормированию, проектированию и контролю заземляющих сетей электроустановок как промышленных предприятий, так и установок бытового назначения. Для специфических условий подземных горных работ предприятий нормативные положения по устройству заземляющих сетей отражены в специальных отраслевых документах: Федеральные нормы и правила

в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах", Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых" [85, 86].

Немаловажную роль в обеспечении условий электробезопасности играют исследования параметров изоляции электрических сетей как отечественными [6, 15, 28, 29, 50, 58-60, 93, 106, 108 и др.], так и зарубежными учеными [109, 111, 112 и др.].

В работе Ю. Д. Глухарева [15] изложены исследования состояния изоляции рудничных электрических сетей предприятий, расположенных в северных районах страны. Представлен анализ основных способов исследования параметров изоляции в зависимости от вида измерительного тока, также разработана рациональная схема замещения сопротивления относительно земли для условий подземных работ.

Большой вклад в исследование параметров изоляции внесли ученые Московского горного института. В работах В. И. Щуцкого, Б. Г. Меньшова, Н. И. Бородина, Г. М. Петрова и др. [28, 50, 106] изложены результаты исследований параметров изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью; изложены принципы исследования состояния изоляции электроустановок; выполнен анализ реального состояния изоляции электрических сетей и электрооборудования шахт и рудников; рассмотрено влияние состояния изоляции на электробезопасность; рассмотрены основные методы контроля параметров изоляции электроустановок напряжением до 1000 В и выше горнодобывающих предприятий.

В работах А. В. Пичуева [58-60] выполнено исследование условий электробезопасности при несимметрии параметров изоляции; обоснована необходимость учета несимметрии фазных напряжений при определении тока через человека; приведены расчетные значения и функциональные зависимости параметров изоляции сети с учетом сопротивления току абсорбции; определены условия возможного резонанса тока утечки через изоляцию.

В указанных выше работах достаточно полно изложены принципы исследования и методы контроля параметров изоляции электрических сетей, однако в недостаточной мере идентифицированы параметры изоляции как случайные величины, не установлены вероятностные законы распределения параметров изоляции и их взаимосвязь.

Исследование параметров изоляции электрических сетей неразрывно связано с разработкой средств контроля сопротивлений изоляции и устройств защиты при нарушении ее целостности. Исследованию указанных вопросов посвящены работы [7, 8, 26, 32, 33, 41, 45, 46, 48, 49, 52-56, 65-67, 71, 88, 89, 92, 96, 98, 104 и др.].

В исследованиях В. В. Нагорных [45, 46] описана система непрерывного контроля сопротивлений изоляции отдельных фаз электрической сети с изолированной нейтралью, основанная на модифицированном методе добавочной проводимости; разработана имитационная модель устройства непрерывного контроля сопротивлений изоляции.

В работе О. Н. Белюстина [8] разработана классификационная структура аппаратов защиты от утечек тока на землю; разработан метод пофазного измерения параметров изоляции; установлены зависимости параметров изоляции от протяженности участков линий и количества подключенного оборудования.

Исследования Ю. Г. Бацежева [7] были направлены на разработку средств электробезопасности на горных предприятиях. В результате при его участии были разработаны способы определения параметров изоляции [2, 4] и устройства контроля сопротивлений изоляции [1, 3].

В работах В. П. Колосюка [32, 33] освещен широкий круг вопросов теории и практики защитного отключения рудничных электроустановок и сетей как переменного, так и постоянного тока.

В работах В. И. Петурова и др. [52-56, 65-67] выполнено исследование и разработка способов и средств контроля параметров изоляции рудничных электрических сетей, рассмотрено устройство контроля сопротивления изоляции и защитного отключения, построенное на основе трансформаторов тока нулевой

последовательности, рассмотрено влияние нестационарных режимов на электробезопасность, предложены новые способы и средства оперативного контроля изоляции в электрических сетях горных предприятий, а также средства от токов утечки и опасного воздействия обратной ЭДС выбега электродвигателей.

В работах Е. Ф. Цапенко [88, 89] освещены основные вопросы, связанные с теорией, методами расчета и созданием совершенной аппаратуры непрерывного контроля изоляции.

В работе М. Л. Сапункова [71] приведено описание нового способа контроля сопротивления изоляции фаз относительно земли в распределительных сетях 6...10 кВ под рабочим напряжением, основанного на контроле приращения мощности, возникающей при создании преднамеренной несимметрии напряжений фаз относительно земли путем подключения дополнительной проводимости на землю.

Большое внимание при исследовании электробезопасности как комплексной проблемы уделяется разработке методов и методик ее исследования [5, 38, 72].

В работе А. В. Ляхомского и О. А. Курбатовой [38] рассмотрен метод комплексной оценки электробезопасности на горных предприятиях.

В работе А. И. Сидорова и др. [72] приводится классификация существующих методов исследования условий электробезопасности, рассматриваются краткие описания, преимущества и недостатки приведенных методов.

Многие ученые и исследователи рассматривают электробезопасность как комплексную, многогранную проблему, охватывая в своих исследованиях различные ее аспекты [11, 14, 34, 37, 39, 42, 51, 57, 61-63, 74, 77, 79-81, 94, 95, 105-107 и др.].

В работе А. А. Буралкова и В. И. Щуцкого [11] изложена методика вероятностной оценки уровня электробезопасности, в основу которой положены причинно-следственные связи возникновения электропоражения. В работе И. Ф. Суворова [80] предложены модели возникновения электроопасной ситуации в системах электроснабжения с изолированной нейтралью на основе логико-

вероятностного метода. При этом в указанных работах недостаточно внимания уделено вопросам вероятностной оценки электробезопасности в аспекте статистических данных параметров изоляции электрических сетей.

В работах А. В. Ляхомского, О. Н. Синчука, А. А. Харитоновой, О. В. Мельника, А. В. Пичуева, Л. В. Гладиллина, В. И. Щуцкого, Ю. Г. Бацежева, Н. И. Чеботаева [39, 57, 61-63, 106] изложены принципы системного подхода к исследованиям электробезопасности, заключающегося в теоретическом обосновании, научном исследовании и практической реализации способов организации действий в системе «человек – электроустановка – среда».

В работе О. Н. Синчука и др. [74] представлены статистические характеристики, экспериментальные и теоретические законы распределения параметров сопротивления изоляции контактных сетей; указывается, что для обеспечения безопасности электроустановок подземной контактной откатки необходимо использовать в решениях критерии электробезопасности для пульсирующих токов. Однако приведенное исследование затрагивает только сети постоянного тока, в то время как задача получения вероятностной оценки параметров изоляции подземных электрических сетей переменного тока остается не выполненной.

В работах недостаточное внимание уделено исследованию электробезопасности с учетом вероятностного подхода к явлениям, обуславливающим возникновение электротравмы. К тому же большая часть проведенных исследований выполнена до введения в действие новых нормативных документов, регламентирующих устройство и безопасную эксплуатацию электрических установок и сетей.

Электробезопасность является комплексной проблемой и должна строиться не только на учете параметров организма человека как объекта поражения, но в значительной степени на создании безопасных эксплуатационных (в первую очередь определяемых сопротивлением изоляции электрических сетей) и внешних условий, которые исключали бы возможность возникновения электрической цепи через тело человека с опасными для него токами. Такой

комплексный подход обеспечивает наиболее эффективное и правильное решение проблемы электробезопасности.

1.3. Электротравматизм на горных предприятиях

1.3.1. Исходные положения

Анализ электротравматизма является постоянным предметом научных исследований, поскольку дает представление об эффективности разрабатываемых организационных, экономических и технических мероприятий, направленных на повышение безопасного применения электрического тока, и в тоже время дает общее представление о состоянии электробезопасности на промышленных предприятиях.

В работах В. И. Щуцкого, Г. Ю. Гордона и др. [18-20, 64, 68, 75, 103 и др.] приведены руководящие и инструктивные материалы по расследованию и анализу электротравматизма на производстве, изложены причины электротравматизма. В работах А. Б. Тряпицына, А. И. Сидорова и др. [82, 83] выполнен анализ электротравматизма в угольной отрасли РФ с 2000 по 2010 годы и возможностей его снижения и установлено следующее: уровень травматизма при подземной добыче угля в Российской Федерации существенно выше, чем при добыче угля в угольных разрезах; объемы подземной добычи угля в Российской Федерации за последние годы почти не изменяются, а объемы добычи угля открытым способом растут; выявлены основные причины травматизма в угольной отрасли Российской Федерации. Указанные исследования по анализу электротравматизма не охватывают современный период, и в связи с чем целесообразно выполнить анализ электротравматизма, охватывающий современный период.

Выполненный анализ электротравматизма на предприятиях горной отрасли основан на статистических данных Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору за 2004-2016 годы [17].

В таблице 1.1 представлена качественная и количественная характеристика опасных производственных объектов (ОПО) горной промышленности, на которых осуществлялся надзор за указанный выше период.

Анализ данных таблицы 1.1 показал, что в угольной промышленности за 2004-2016 годы количество поднадзорных ОПО несколько увеличилось – с 390 в 2004 году до 473 в 2016 году. Наибольшее количество ОПО – 512 единиц – имело место в 2014 году. За указанный период помимо количественных, наблюдались и качественные изменения в составе поднадзорных ОПО. Так, если в 2004 году было 153 шахты, то к 2016 году это количество уменьшилось на 36,6 % и составило 97. Число же предприятий, осуществляющих добычу угля открытым способом и его переработку, увеличилось: разрезов – на 45,7 %, а обогатительных и брикетных фабрик – на 103,8 %.

В горнорудной и нерудной промышленности наблюдалась обратная тенденция – количество ОПО, находящихся под надзором службы, уменьшилось с 7157 в 2004 году до 2578 в 2016 году. Это связано с изменениями, внесенными в 2013 году в Федеральный закон от 21 июля 1997 г. № 116-ФЗ «О промышленной безопасности опасных производственных объектов», согласно которым объекты россыпных и общераспространенных ископаемых, осуществляющих добычу открытым способом без применения взрывных работ, были выведены из списка ОПО. Это привело к уменьшению количества инспектируемых предприятий и объектов по отношению к 2004 году в 2,8 раза. Наибольшее количество ОПО горнорудной и нерудной промышленности наблюдалось в 2012 году и составляло 12990 единиц.

Помимо этого, в 2013–2014 гг. проведена перерегистрация опасных производственных объектов с определением классов опасности, что также привело к сокращению числа ОПО. Государственный горный надзор на предприятиях и объектах, исключенных из числа опасных, осуществлялся в соответствии с Законом Российской Федерации «О недрах» и другими законами, нормативными и правовыми актами Российской Федерации.

Таблица 1.1 – Предприятия и объекты горной промышленности, на которых проводился анализ несчастных случаев

Предприятие, объект горной промышленности	Годы												
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
Угольная промышленность													
Шахта	153	158	177	177	178	157	106	109	119	101	106	101	97
Разрез	184	197	199	176	195	185	180	218	224	231	268	258	268
Обогатительная, брикетная фабрика	53	55	61	63	98	62	58	76	69	69	138	109	108
Всего	390	410	437	416	471	404	344	403	412	401	512	468	473
Горнорудная и нерудная промышленность													
Подземный рудник, в т. ч. объект подземного строительства транспортного и специального назначения, объект, не связанный с добычей полезных ископаемых	244	555	497	707	517	458	952	933	965	424	187	368	318
Карьер, в т. ч. драга, промывочный прибор	5364	5822	6435	6705	7675	7140	7320	9800	10018	3449	1960	2732	1877
Обогатительная, агломерационная, окомковательная, дробильно-сортировочная фабрика, в т. ч. гидротехническое сооружение	1549	1645	1754	1798	1837	1807	1748	1992	2007	942	396	616	383
Всего	7157	8022	8686	9210	10029	9405	10020	12725	12990	4815	2543	3716	2578
Всего по горной промышленности	7547	8432	9123	9626	10500	9809	10364	13128	13402	5216	3055	4184	3051

В соответствии с вышеизложенным, в угольной промышленности можно отметить тенденцию перехода к открытой разработке угольных месторождений, что связано с меньшими опасностями и трудностями ведения горных работ. В горнорудной и нерудной промышленности напротив наблюдается увеличение числа объектов, разрабатывающих месторождения подземным способом. В целом по горной промышленности за 2004–2016 гг. число ОПО снизилось в 2,5 раза.

Интерес для рассмотрения представляют удельные показатели электротравматизма на предприятиях угольной, горнорудной и нерудной отраслей.

Коэффициент летальности электротравм K_L определяется по выражению:

$$K_L = \frac{n}{N_p} 10^3, \text{ чел./тыс. чел.}, \quad (1.1)$$

где n – число электротравм со смертельным исходом, чел.; N_p – среднесписочная численность работающих, чел.

Коэффициент K_1 , отражающий число электротравм со смертельным исходом на тысячу единиц ОПО:

$$K_1 = \frac{n}{N_{\text{ОПО}}} 10^3, \text{ чел./тыс. ед. ОПО}, \quad (1.2)$$

где $N_{\text{ОПО}}$ – количество единиц ОПО.

Коэффициент K_2 , отражающий число электротравм со смертельным исходом на объем добычи угля (млн. т.) или горной массы (млн. м³):

$$K_2 = \frac{n}{A}, \text{ чел./млн. т (млн. м}^3\text{)}, \quad (1.3)$$

где A – объем добычи угля (млн. т.) или горной массы (млн. м³).

Рассмотренные показатели дают более наглядное представление о состоянии электротравматизма со смертельным исходом на предприятиях горных отраслей.

1.3.2. Динамика электротравматизма

На рисунке 1.1 представлена динамика летального электротравматизма за период с 2004 по 2016 годы.



Рисунок 1.1 – Динамика летального электротравматизма на горных предприятиях (в % от общего травматизма с летальным исходом)

Анализ рисунка 1.1 показал, что для предприятий угольной отрасли тенденция практически неизменна, что свидетельствует об отсутствии снижения уровня электротравматизма. Наибольшее количество электротравм с летальным исходом в общем травматизме (11,3 %) имело место в 2008 году, наименьшее количество (0 %) соответствует 2016 году.

Для предприятий рудной и нерудной отраслей за период с 2004 по 2010 годы характерна тенденция снижения электротравматизма с летальным исходом, а за период с 2012 по 2016 годы наблюдался рост числа летальных электротравм. Наибольшее количество электротравм с летальным исходом имело место в 2016 году (12,8 %).

1.3.3. Электротравматизм в угольной промышленности

На предприятиях угольной промышленности в период с 2004 по 2016 годы общее число травм с летальным исходом составило 1038 несчастных случаев (таблица 1.2).

На предприятиях с подземным способом ведения горных работ произошло 85 % несчастных случаев с летальным исходом, 9,3 % – на предприятиях с открытым способом разработки, на обогатительных фабриках и технологическом комплексе поверхности – 5,7 % случаев. На электротравмы с летальным исходом на предприятия угольной промышленности приходится 6,5 % от всего числа летальных травм.

На подземных горных работах доля электротравм от всех несчастных случаев с летальным исходом составляет в среднем 3,8 %, однако в 2015 году это значение достигало 18,2 %. Вместе с этим электроустановки зачастую являются источником аварий в подземных условиях – воспламенения, взрывы метано-воздушной смеси, пожары.

На открытых горных работах доля электротравм от всего числа несчастных случаев с летальным исходом составляет 18,2 %, а на обогатительных фабриках и технологическом комплексе поверхности – 13,7 %.

Следует отметить, что в шахтах ситуация с электротравматизмом, связанным с техническими причинами, стоит более остро. Это обусловлено более опасными и трудными условиями ведения работ, что в свою очередь приводит к интенсивному износу оборудования, снижению сопротивления изоляции кабельных сетей, повышая опасность электротравмирования.

Представляет интерес показатель удельного количества электротравм с летальным исходом по отношению к количеству ОПО, численности персонала и объему добычи угля. В таблице 1.3 представлены удельные показатели электротравматизма с летальным исходом на предприятиях угольной промышленности, определенные с использованием выражений 1.1-1.3.

Таблица 1.2 – Травматизм с летальным исходом в угольной промышленности

Виды горных работ	2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016	
	чел.	%																								
Подземные, в т. ч.	132	89,2	81	75,7	53	77,9	216	93,1	41	77,4	36	75,0	122	90,4	33	71,7	28	77,8	57	90,5	18	69,2	11	55,0	54	96,4
электропоражения	3	2,3	0	0,0	1	1,9	2	0,9	3	7,3	0	0,0	1	0,8	1	3,0	1	3,6	3	5,3	1	5,6	2	18,2	0	0,0
Открытые, в т. ч.	9	6,1	17	15,9	10	14,7	12	5,2	8	15,1	9	18,8	12	8,9	3	6,6	3	8,3	2	3,2	3	11,6	7	35,0	2	3,6
электропоражения	2	22,2	5	29,4	4	40,0	3	25,0	2	25,0	4	44,4	2	16,7	0	0,0	1	33,3	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Технологический комплекс поверхности, в т. ч.	7	4,7	9	8,4	5	7,4	4	1,7	4	7,5	3	6,2	1	0,7	10	21,7	5	13,9	4	6,3	5	19,2	2	10,0	0	0,0
электропоражения	1	14,3	3	33,3	0	0,0	0	0,0	1	25,0	0	0,0	0	0,0	2	20,0	2	40,0	1	25,0	1	20,0	0	0,0	0	0,0
Всего, в т. ч.	148	100,0	107	100,0	68	100,0	232	100,0	53	100,0	48	100,0	135	100,0	46	100,0	36	100,0	63	100,0	26	100,0	20	100,0	56	100,0
электропоражения	6	4,1	8	7,5	5	7,4	5	2,6	6	11,3	4	8,3	3	2,2	3	6,6	4	11,1	4	6,3	2	7,7	2	10,0	0	0,0

Таблица 1.3 – Удельные показатели электротравматизма с летальным исходом в угольной промышленности

Показатель	Годы													
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Количество опасных производственных объектов, ед. ОПО, в т. ч.:	390	410	437	416	471	404	344	403	412	401	512	468	473	
шахта	153	158	177	177	178	157	106	109	119	101	106	101	97	
разрез	184	197	199	176	195	185	180	218	224	231	268	258	268	
обогащительная, брикетная фабрика	53	55	61	63	98	62	58	76	69	69	138	109	108	
Объем добычи угля, млн. т, в т. ч.:	287,6	300,2	294,1	315,5	319,5	301,8	323,2	337,4	355,2	352,0	358,2	373,4	385,7	
подземным способом	105,5	108,5	111,1	111,5	105,3	108,4	102,7	101,0	112,9	101,0	105,3	103,7	104,6	
открытым способом	182,1	191,7	183,0	204,0	214,2	193,4	220,5	236,4	242,3	251,0	252,9	269,7	281,1	
Численность работающих, тыс. чел.	н/д*	н/д	н/д	213,6	208,5	184,4	179,0	126,0	166,0	158,1	152,6	217,3	116,2	
Количество электротравм с летальным исходом, чел., в т. ч.:	6	8	5	5	6	4	3	3	4	4	2	2	0	
подземные горные работы	3	0	1	2	3	0	1	1	1	3	1	2	0	
открытые горные работы	2	5	4	3	2	4	2	0	1	0	0	0	0	
технологический комплекс поверхности	1	3	0	0	1	0	0	2	2	1	1	0	0	
Удельный показатель электротравматизма, в т. ч.:	К _л , чел./тыс. чел.	-	-	-	0,023	0,029	0,022	0,017	0,024	0,024	0,025	0,013	0,009	0,000
	К ₁ , чел./тыс. ед. ОПО	15,4	19,5	11,4	12,0	12,7	9,9	8,7	7,4	9,7	10,0	3,9	4,3	0,0
	К ₂ , чел./млн. т	0,020	0,027	0,017	0,016	0,019	0,013	0,009	0,009	0,011	0,011	0,006	0,005	0,000
на подземных горных работах	К ₁ , чел./тыс. ед. ОПО	19,6	0,0	5,6	11,3	16,9	0,0	9,4	9,2	8,4	29,7	9,4	19,8	0,0
	К ₂ , чел./млн. т	0,028	0,000	0,009	0,018	0,028	0,000	0,010	0,010	0,009	0,030	0,009	0,019	0,000
на открытых горных работах	К ₁ , чел./тыс. ед. ОПО	10,9	25,4	20,1	17,0	10,3	21,6	11,1	0,0	4,5	0,0	0,0	0,0	0,0
	К ₂ , чел./млн. т	0,011	0,026	0,022	0,015	0,009	0,021	0,009	0,000	0,004	0,000	0,000	0,000	0,000
на технологическом комплексе поверхности	К ₁ , чел./тыс. ед. ОПО	18,9	54,5	0,0	0,0	10,2	0,0	0,0	26,3	29,0	14,5	7,2	0,0	0,0

* – нет данных.

Анализируя таблицу 1.3, можно сделать вывод, что удельные показатели электротравматизма с летальным исходом за последние годы несколько уменьшились, хотя наблюдалось значительное варьирование рассматриваемых показателей в течение рассматриваемого периода. В некоторые годы на определенных видах работ не было допущено случаев летального электротравмирования. В этом аспекте особо примечателен 2016 год, когда случаев гибели людей из-за воздействия электрического тока не было допущено вовсе. Но это обстоятельство не позволяет сделать вывод об искоренении случаев гибели персонала от электротравм.

Не принимая во внимание 2016 год, минимальные показатели удельного количества электротравм с летальным исходом по отношению к количеству ОПО, численности персонала и объему добычи угля имеют место в 2015 году. Это говорит об определенной тенденции снижения за последние годы случаев летального электротравмирования.

1.3.4. Электротравматизм в горнорудной и нерудной промышленности

Горнорудная и нерудная промышленность в нашей стране представлена отраслями: черной и цветной металлургией, строительными материалами, агрохимическим и строительным комплексами, атомной энергетикой.

В таблице 1.4 представлена статистика несчастных случаев с летальным исходом на всех ОПО горнорудной и нерудной промышленности. За рассматриваемый период произошло 874 летальных несчастных случая, что несколько меньше, чем за аналогичный период в угольной промышленности.

По видам горных работ за рассматриваемый период несчастные случаи с летальным исходом в среднем распределялись следующим образом: 56,8 % случаев произошло при ведении горных работ подземным способом, 34,9 % – на открытых горных работах и 8,3 % – на дробильно-обогажительных фабриках.

Таблица 1.4 – Травматизм с летальным исходом в горнорудной и нерудной промышленности

Виды горных работ	2004		2005		2006		2007		2008		2009		2010		2011		2012		2013		2014		2015		2016	
	чел.	%																								
Подземные	35	42,7	39	48,2	63	63,0	39	48,2	34	54,0	37	52,1	36	51,4	33	55,9	38	55,1	33	60,0	35	60,3	37	80,4	26	66,7
Открытые	40	48,8	31	38,3	34	34,0	38	46,9	25	39,7	25	35,2	30	42,9	15	25,4	23	33,3	18	32,7	17	29,3	9	19,6	11	28,2
Дробильно-обогащительные фабрики	7	8,5	11	13,5	3	3,0	4	4,9	4	6,3	9	12,7	4	5,7	11	18,7	8	11,6	4	7,3	6	10,4	0	0,0	2	5,1
Всего, в т. ч.	82	100,0	81	100,0	100	100,0	81	100,0	63	100,0	71	100,0	70	100,0	59	100,0	69	100,0	55	100,0	58	100,0	46	100,0	39	100,0
электропоражения	8	9,8	7	8,6	9	9,0	8	9,9	6	9,5	6	8,5	4	5,7	3	5,1	3	4,3	5	9,1	5	8,6	1	2,2	5	12,8

Таблица 1.5 – Удельные показатели электротравматизма с летальным исходом в горнорудной и нерудной промышленности

Показатель	Годы													
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	
Количество опасных производственных объектов, ед. ОПО	7157	8022	8686	9210	10029	9405	10020	12725	12990	4815	2543	3716	2578	
Объем добычи горной массы, млн. м ³	1319,2	1403,1	1436,5	1438,9	1496,9	1532,8	1547,1	1677,2	1701,8	1291,1	1239,0	1446,7	1267,2	
Численность работающих, тыс. чел.	н/д*	н/д	н/д	н/д	н/д	571,4	565,0	567,6	551,8	395,8	330,0	285,0	262,0	
Количество электротравм с летальным исходом, чел.	8	7	9	8	6	6	4	3	3	5	5	1	5	
Удельный показатель электротравматизма	К _л , чел./тыс. чел.	н/д	н/д	н/д	н/д	н/д	0,011	0,007	0,005	0,005	0,013	0,015	0,004	0,019
	К ₁ , чел./тыс. ед. ОПО	1,12	0,87	1,04	0,87	0,6	0,64	0,4	0,24	0,23	1,04	1,97	0,27	1,94
	К ₂ , чел./млн. т	0,006	0,005	0,006	0,006	0,004	0,004	0,003	0,002	0,002	0,004	0,004	0,001	0,004

* – нет данных.

На летальные электротравмы в целом по горнорудной и нерудной промышленности за 2004-2016 годы в среднем пришлось 8 % от всего числа несчастных случаев с летальным исходом, что на 1,5 % больше, чем за аналогичный период в угольной промышленности. В течение указанного периода относительное количество электротравм находилось примерно на одном уровне, хотя за последний год рассматриваемого периода этот показатель был в 1,5 раза выше среднего.

Максимальное число электротравм с летальным исходом произошло в 2006 году, минимальное число электротравм произошло в 2015 году.

При ведении подземных горных работ и на дробильно-обогажительных фабриках электротравмы наиболее часто происходят в электрических сетях напряжением до 1 кВ. Это связано как со спецификой производства, так и с условиями, в которых эксплуатируется электрооборудование и работает обслуживающий его персонал. Также следует отметить, что в подземных выработках горнорудных предприятий для электроснабжения преимущественно используются сети низкого напряжения.

На открытых горных работах электротравматизм преимущественно обусловлен организационными причинами (низкий уровень квалификации обслуживающего персонала, недостаточный контроль организации и проведения работ, невнимательность и личная неосторожность). Электротравмы на подземных горных работах и дробильно-обогажительных фабриках характеризуются примерно в равной степени как организационными причинами, упомянутыми выше, так и техническими. Технические связаны со специфическими условиями ведения работ (агрессивный состав атмосферы, высокая влажность, запыленность рабочей зоны), что сказывается на преждевременном ухудшении состояния электрооборудования и питающей его сети.

Удельные показатели электротравматизма с летальным исходом в горнорудной и нерудной промышленности приведены в таблице 1.5. Несмотря на уменьшение числа ОПО в горнорудной и нерудной промышленности, начиная с

2013 года, удельные показатели летального электротравматизма увеличились. Удельное количество электротравм с летальным исходом по отношению к численности персонала выросло на 42,1 % к уровню 2009 года, а по отношению к количеству ОПО – на 67 % к уровню того же года. Это свидетельствует об ухудшении условий, обеспечивающих электробезопасность на предприятиях горнорудной и нерудной промышленности.

1.3.5. Причины электротравматизма в горной промышленности

В связи с тем, что подробные данные по электротравматизму на предприятиях горного профиля за последние годы отсутствуют, то анализ причин электротравматизма выполнен на основе исследований ученых научной школы Московского государственного горного университета [35, 99, 101, 102]. Распределение причин электротравм на предприятиях горной промышленности страны приведено в таблице 1.6.

Анализируя таблицу, можно увидеть, что подавляющее число электротравм происходит при прикосновении непосредственно к токоведущим частям в электроустановках подземного и поверхностного комплексов угольных шахт, на открытых работах и фабриках предприятий горнорудной и нерудной промышленности (от 73,4% до 92,4% случаев), т. е. при прямом прикосновении.

Распределение электропоражений по типам электроустановок следующее: 40% происходит на воздушных и кабельных линиях; 20% происходит в распределительных устройствах, в т. ч. комплектных, в коммутационных аппаратах, аппаратуре управления и защиты; 20% приходится на передвижные установки и электрооборудование; 20% случаев происходят при работе с ручным инструментом, переносным освещением и в других электроустановках.

Наибольшее количество поражений электрическим током происходит при однополюсном прикосновении (касание одной рукой – путь тока «рука-нога (ноги)») и двухполюсным прикосновением (касание двумя руками – путь тока «рука-рука»). Оба случая по тяжести воздействия электрического тока примерно идентичны.

Таблица 1.6 – Причины электротравматизма в горной промышленности (в %)

№ п/п	Причина электротравматизма	Горнорудная и нерудная промышленность			Угольная промышленность		
		Подземные	Открытые	Фабрики	Подземные	Открытые	Тех. комплекс поверхности
1	Прикосновение к токоведущим частям электроустановок, в т. ч.	84,4	87,0	90,0	73,4	92,4	81,8
1.1	случайное касание голых проводов, частей и узлов токоприемников	21,9	31,0	33,4	9,7	24,0	28,8
1.2	прикосновение к контактному проводу	50,0	6,2	-	37,1	10,1	-
1.3	прикосновение к кабелям и проводам с нарушенной изоляцией	3,2	3,2	3,4	8,1	5,1	7,6
1.4	при работе без снятия напряжения	3,1	28,8	20,0	8,9	36,7	27,3
1.5	при ошибочной подаче напряжения во время производства работ	3,1	8,7	13,2	7,2	8,9	9,1
1.6	прочие	3,1	9,1	20,0	2,4	7,6	9,0
2	Прикосновение к частям электроустановок, механизмов и машин, нормально не находящихся под напряжением, в т. ч.	15,6	13,0	10,0	26,6	7,6	18,2
2.1	вследствие замыкания на корпус из-за повреждения или недопустимого снижения уровня сопротивления изоляции	12,5	5,8	6,7	25,0	7,6	3,0
2.2	из-за неправильного монтажа токоведущих и заземляющих жил	-	-	3,3	1,6	-	6,0
2.3	при касании механизмов и машин проводов ЛЭП	-	5,6	-	-	-	-
2.4	прочие	3,1	1,6	-	-	-	9,2
	ИТОГО	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0

По причинам возникновения все случаи электротравмирования подразделяются на 2 группы.

Первая группа – прикосновение непосредственно к токоведущим частям (прямое прикосновение), которое имеет следующее распределение по производственным комплексам горных предприятий:

- для подземного комплекса угольных шахт и рудников, соответственно, 73,4% и 84,4%;
- для открытых горных работ угольных разрезов и рудных, нерудных карьеров, соответственно, 92,4% и 87,0%;
- для комплекса промплощадок шахт и разрезов, соответственно, 81,8% и 90,0%.

Вторая группа – прикосновение к открытым проводящим частям, которые вследствие аварийных режимов работы электроустановки могут оказаться под напряжением (косвенное прикосновение), которое имеет следующее распределение по производственным комплексам горных предприятий:

- для подземного комплекса угольных шахт и рудников, соответственно, 26,6% и 15,6%;
- для открытых горных работ угольных разрезов и рудных, нерудных карьеров, соответственно, 7,6% и 13,0%;
- для комплекса промплощадок шахт и разрезов, соответственно, 18,2% и 10,0%.

На рисунке 1.2 представлены диаграммы, показывающие распределения причин электротравматизма на предприятиях угольной, рудной и нерудной отраслей.

Анализ электротравматизма на горных предприятиях показывает, что:

- электротравматизм в отдельные годы достигает 12,8% от общего травматизма;

- в подземных выработках угольных шахт электротравматизм достигает 33,1% от общего количества травм с летальным исходом в подземных выработках;

- практически каждые три из четырех электротравм в подземных выработках угольных шахт происходят по причине прикосновения к токоведущим частям электроустановок (прямое прикосновение).



Рисунок 1.2 – Причины электротравматизма на предприятиях горных отраслей

В связи с вышеизложенным представляется целесообразным проведение исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

1.4. Обоснование и постановка задач диссертационного исследования

Как показал выполненный в п. 1.3 анализ промышленного травматизма, за период с 2004 по 2016 годы в горнодобывающей промышленности не произошло сколько-нибудь значительного снижения уровня электротравматизма. Это

обстоятельство позволяет сделать вывод, что вопросы рассмотрения условий электробезопасности на предприятиях горной отрасли, их исследование (особенно в условиях подземных работ) остается актуальной задачей.

Выполненный обзор (п. 1.2) показал, что проведенные исследования и полученные в них результаты включают основные, обуславливающие проблему электробезопасности, аспекты, касающиеся: анализа электротравматизма, исследования и установления первичных критериев электробезопасности, исследования и установления нормативов параметров изоляции электрических сетей и электрооборудования, влияния и установления нормативных требований к режимам нейтрали и систем заземления на условия электробезопасности.

В выполненных исследованиях [6, 15, 28, 29, 50, 58-60, 93, 106, 108, 109, 111, 112] приводится широкий спектр методов, методик исследования параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий. Однако, достаточно полного анализа параметров изоляции электрических сетей, как случайных величин, их статистических взаимосвязей и взаимного влияния на условия электробезопасности выполнено не было.

В исследованиях [7, 8, 26, 32, 33, 41, 45, 46, 48, 49, 52-56, 65-67, 71, 88, 89, 92, 96, 98, 104] приводятся методики и методические принципы измерения, представлены способы, приемы и схемы для исследования параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий. При этом не уделяется достаточно внимания определению статистических характеристик параметров изоляции, емкости электрических сетей.

В этой связи в недостаточной мере идентифицированы параметры изоляции подземных электрических сетей, включая емкость относительно земли, как случайных величин с определением их статистических характеристик, а также вероятностных законов распределения для предприятий различных горных отраслей.

Вместе с этим практически отсутствует анализ условий электробезопасности в подземных электрических сетях, являющихся одним из основных источников электропоражения при ведении подземных работ, с учетом вероятностных законов распределения параметров изоляции, а также емкости сети относительно земли.

Вышеизложенные обстоятельства не позволяют проводить анализ условий, оценку уровня электробезопасности с учетом вероятностного подхода, обеспечивающего более адекватное представление о состоянии изоляции как основного средства безопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

На основании выполненного анализа состояния вопросов электробезопасности на горных предприятиях и обоснования вопросов, требующих решения, в диссертационном исследовании ставятся следующие задачи:

1. Обосновать и разработать методические принципы и методики исследования параметров изоляции и условий электробезопасности в подземных электрических сетях с учетом вероятностного подхода, обеспечивающего более адекватное представление о процессе обеспечения электробезопасности.

2. Исследовать состояние изоляции подземных электрических сетей с определением статистических характеристик и установлением вероятностных законов распределения полного, активного, емкостного сопротивлений, а также емкости сети относительно земли.

3. Исследовать условия электробезопасности в подземных сетях с оценкой вероятностных уровней обеспечения электробезопасности, установлением областей электробезопасности с учетом параметров изоляции и допустимого тока через человека.

4. Разработать рекомендации по обоснованию условий и повышению уровня электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

Глава 2. Методика исследования электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий

2.1. Методические принципы исследования электробезопасности

Электробезопасность представляет собой трехэлементную систему: «человек – рабочая среда – электроустановка» [106]. В этой связи исследование электробезопасности целесообразно проводить с рассмотрением вопросов, влияющих на условия электробезопасности в указанной трехэлементной системе. Подземные электрические сети, как показывает анализ электротравматизма, выполненный в первой главе, являются одним из основных источников электротравм, поэтому целесообразно провести исследование электробезопасности в указанных сетях с учетом влияния всех элементов трехэлементной системы.

В соответствии с правилами безопасности [85, 86] в подземных выработках угольных шахт и рудников применяются электрические сети с изолированной нейтралью (система IT) напряжением до и выше 1 кВ.

Специфические условия эксплуатации подземных электрических сетей и горного электрооборудования обуславливают высокую вероятность снижения сопротивления изоляции, что является основным фактором, определяющим электробезопасность эксплуатации электротехнического хозяйства горных предприятий. Токи утечки в электрических сетях, вызывающие опасные ситуации (электротравмы, пожары, взрывы), главным образом зависят от параметров изоляции электроустановок и их отдельных элементов.

Состояние изоляции подземных электрических сетей определяется состоянием ее параметров: активного (R), емкостного (X), полного (Z) сопротивления и емкости относительно земли (C). В результате исследования состояния изоляции требуется получить надежные выводы о состоянии параметров изоляции.

В процессе эксплуатации электроустановок в подземных условиях горного производства параметры изоляции зависят от большого количества факторов: качества электроизоляционных материалов, теплового и временного старения изоляции, уровня технической эксплуатации электрооборудования, влажности и агрессивности окружающей среды, режима работы сетей и их отдельных элементов, протяженности кабельных линий и т. п. [28, 95, 106]. Влияние этих факторов на параметры изоляции подземных сетей в каждый момент времени имеет случайный характер. Поэтому справедливо утверждать, что параметры изоляции электроустановок вследствие большого числа влияющих на них факторов, действие которых происходит в условиях неопределенности и неполноты информации, носят случайный характер и должны рассматриваться как случайные величины, для исследования которых целесообразно использовать экспериментальные данные применять методы теории вероятности и математической статистики.

Статистическое исследование должно основываться на массово-типичных данных [106]. Условие массовости экспериментов требует наиболее полного охвата измерениями всех условий эксплуатации электрических сетей и электроустановок. Достаточно достоверные и представительные данные могут быть получены при исследовании по методу выборочного наблюдения и должны в полной мере удовлетворять условию количественной достоверности [7, 8, 14, 94].

В процессе исследования требуется обеспечить критическую оценку исходного статистического материала. Только после изучения указанного материала, выявления и корректировки его недостатков может быть осуществлен переход к анализу статистических данных.

Воздействие электрического тока на организм человека в значительной мере зависит от величины тока, продолжительности его воздействия, пути тока через

тело человека и сопротивления тела человека. В меньшей степени – от частоты, формы кривой тока, коэффициента пульсаций и других факторов.

При исследовании условий электробезопасности напряжение электрических сетей должно соответствовать стандартным величинам напряжений, используемым в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников.

Электрическое сопротивление тела человека зависит от влажности кожи, размера поверхности контакта, индивидуальных особенностей организма и других факторов. При исследовании условий электробезопасности сопротивление тела человека следует принимать в соответствии со стандартом [21]. Вследствие того, что сопротивление тела индивидуально для человека и является случайной величиной, для расчетной оценки опасности электропоражения в электроустановках в качестве критерия опасности следует использовать ток через тело человека ($I_{ч}$).

При исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий значения тока, протекающего через тело человека, необходимо определять с учетом активного сопротивления изоляции и емкости фаз сети относительно земли, включенных последовательно в цепь тока, протекающего через человека. В соответствии с тем, что значения активного сопротивления изоляции и емкости фаз сети являются случайными величинами, ток, протекающий через человека, должен рассматриваться как случайная величина, определяемая параметрами цепи тока через человека.

В соответствии с [40, 106 и др.] допустимые значения тока, протекающего через тело человека, зависят от времени его воздействия. Результаты вышеуказанных исследований позволили разработать нормативные документы, устанавливающие предельно допустимые значения тока, протекающего через человека, в зависимости от времени его воздействия [21, 85, 86]. При исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях время воздействия тока на организм человека и соответствующее ему допустимое

значение тока следует принимать в соответствии с указанными нормативными документами.

Кроме вышеперечисленных факторов при исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий следует принимать во внимание условия поражения человека электрическим током, связанные со схемами включения человека в электроустановку, в числе которых:

- двухфазное прикосновение (прикосновение к двум фазам сети);
- однофазное прикосновение (прикосновение к одной фазе сети);
- прикосновение к металлическим нетоковедущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции;
- включение под напряжение шага [72].

Случаи двухфазного прикосновения и включения под напряжение шага довольно редки по сравнению с однофазным прикосновением к токоведущим частям электроустановок и прикосновением к металлическим нетоковедущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции. В соответствии с этим при исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях с изолированной нейтралью целесообразно рассмотреть два вида условий электропоражения:

- однофазное прикосновение к токоведущим частям электроустановки, находящимся под напряжением (прямое прикосновение);
- прикосновение к металлическим нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции (косвенное прикосновение).

Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением в результате

повреждения изоляции, необходимо проводить с учетом влияния на ток, протекающий через тело человека, сопротивления заземляющего устройства. Значение сопротивления заземляющего устройства следует принимать в соответствии с нормативными документами [85, 86].

2.2. Методика исследования параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий

2.2.1. Определение статистических характеристик параметров изоляции

В основу методики определения статистических характеристик параметров изоляции подземных электрических сетей положены статистические данные, представленные в виде графической интерпретации экспериментальных функций распределения параметров изоляции: активного, емкостного, полного сопротивлений и емкости сети относительно земли угольных шахт и рудников различных горнопромышленных районов страны [94, 106].

В результате первичной обработки статистической информации требуется получить интервальные вариационные ряды параметров изоляции подземных электрических сетей.

С применением методов теории вероятности и математической статистики для первоначального анализа вариационных рядов необходимо определить статистические характеристики параметров изоляции [16, 70].

Одной из основных статистик случайной величины является средневзвешенное значение, которое требуется определить для активного, емкостного, полного сопротивлений и емкости относительно земли, и которое характеризует средний уровень параметров изоляции в подземных выработках.

Средневзвешенное значение параметра изоляции определяется в результате взвешивания путем суммирования произведений значений середин интервалов интервального вариационного ряда на их частоты. Для распределений активного,

емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости относительно земли средневзвешенные значения определяется по нижеприведенным формулам:

$$\bar{R} = \sum_1^i R_i P_i, \text{кОм}; \quad (2.1)$$

$$\bar{X} = \sum_1^i X_i P_i, \text{кОм}; \quad (2.2)$$

$$\bar{Z} = \sum_1^i Z_i P_i, \text{кОм}; \quad (2.3)$$

$$\bar{C} = \sum_1^i C_i P_i, \text{мкФ}; \quad (2.4)$$

где R_i, X_i, Z_i – значение середины i -го интервала интервального вариационного ряда активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции соответственно, кОм; C_i – значение середины i -го интервала интервального вариационного ряда емкости относительно земли, мкФ; P_i – частота i -го интервала.

Степень вариации параметров изоляции оценивается дисперсией и стандартным отклонением. Для распределений активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости относительно земли подземных электрических сетей стандартное отклонение определяется по нижеприведенным формулам:

$$\sigma_R = \sqrt{\sum_1^i (R_i - \bar{R})^2 P_i}, \text{кОм}; \quad (2.5)$$

$$\sigma_X = \sqrt{\sum_1^i (X_i - \bar{X})^2 P_i}, \text{кОм}; \quad (2.6)$$

$$\sigma_Z = \sqrt{\sum_1^i (Z_i - \bar{Z})^2 P_i, \text{кОм}}, \quad (2.7)$$

$$\sigma_C = \sqrt{\sum_1^i (C_i - \bar{C})^2 P_i, \text{кОм}}, \quad (2.8)$$

где $\sum_1^i (R_i - \bar{R})^2 P_i$, $\sum_1^i (X_i - \bar{X})^2 P_i$, $\sum_1^i (Z_i - \bar{Z})^2 P_i$ – дисперсии распределений активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции соответственно, кОм²; $\sum_1^i (C_i - \bar{C})^2 P_i$ – дисперсия распределения емкости относительно земли, мкФ².

Наряду с дисперсией и стандартным отклонением для описания колеблемости параметров изоляции подземных электрических сетей целесообразно использовать квантили, квартили и процентиля [16].

Интерквартильный размах (разность между третьим (верхним, $P = 0,75$) и первым (нижним, $P = 0,25$) квартилями) является характеристикой разброса распределений параметров изоляции и является робастным аналогом дисперсии. Квантиль порядка $P = 0,5$ – медиана – показывает значение исследуемого параметра, лежащее в середине упорядоченного вариационного ряда. Медиану и интерквартильный размах требуется использовать вместо математического ожидания и дисперсии для оценки распределений, отличных от нормального.

На основе величин минимальной и максимальной вариант, квартилей, значений медианы и интерквартильного размаха интервальных вариационных рядов параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников требуется построить диаграммы размаха. Построение диаграмм размаха для определенного параметра изоляции подземных электрических сетей различных горнопромышленных районов позволяет провести сравнение этого параметра для разных горно-геологических условий и технологий ведения горных работ, тем самым отражая условия окружающей среды в трехэлементной системе обеспечения электробезопасности.

Диаграммы размаха позволяют провести предварительную оценку характера изменения значений активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости подземных электрических сетей. С помощью диаграмм размаха производится визуальная оценка медианы, квартилей, степени variability (дисперсии) исследуемых величин, а также симметрии распределений. Это необходимо для выдвижения гипотез о принадлежности параметров изоляции законам распределения и определения их параметров.

2.2.2. Моделирование вероятностных законов распределения параметров изоляции

На основе анализа диаграмм размаха делается вывод о принадлежности распределений параметров изоляции законам, отличным от нормального закона распределения.

Для определения вида закона распределения параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий с учетом анализа диаграмм размаха выдвигаются нулевые и конкурирующие гипотезы. При этом гипотезы о виде закона распределения формулируются следующим образом: нулевые гипотезы (H_0) – о принадлежности параметров изоляции и емкости сети к гипотетическому закону распределения; конкурирующие гипотезы (H_1) – отвергающие нулевые гипотезы.

Проверка гипотез о принадлежности распределений активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости относительно земли к логнормальному или гамма-закону распределения осуществляется с применением критериев согласия Колмогорова-Смирнова и χ^2 -Пирсона.

Согласно выдвинутым гипотезам, параметры изоляции подземных электрических сетей могут описываться логнормальным или гамма-законом распределения случайной величины. Указанные законы распределения являются 2-х параметрическими.

В общем виде дифференциальные законы (плотности распределения вероятности) логнормальных и гамма распределений параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий описываются формулами:

$$f(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}; \quad (2.9)$$

$$f(x) = x^{\alpha-1} \cdot \frac{e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad (2.10)$$

где $\Gamma(\alpha) = \int_0^\infty x^{\alpha-1} e^{-x} dx$ – гамма-функция Эйлера; x – параметр изоляции или емкость сети.

Для проверки гипотез требуется определить параметры экспериментального закона распределения с использованием принципа максимума правдоподобия или метода моментов [16, 76]. В настоящей методике принят метод моментов как наиболее простой.

Параметры, входящие в выражения для плотности распределения вероятности (2.9, 2.10), в соответствии с методом моментов определяются по статистикам: математическому ожиданию $M(x)$ и дисперсии $D(x)$.

Для логнормального закона распределения вероятностей параметры μ и σ^2 согласно [16] вычисляются по выражениям:

$$\begin{cases} M(x) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}; \\ D(x) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}. \end{cases} \quad (2.11)$$

Учитывая, что при достаточно большом объеме выборки средневзвешенное значение (\bar{x}) стремится к математическому ожиданию, а выборочная дисперсия (σ^2) стремится к генеральной дисперсии, имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} \bar{x} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}; \\ \sigma^2 = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}. \end{cases} \quad (2.12)$$

Параметры μ и σ^2 экспериментальных логнормальных законов распределения параметров изоляции подземных электрических сетей и емкости

сетей относительно земли угольных шахт и рудников определяются с помощью решения системы уравнений 2.12.

Для закона гамма-распределения параметр формы α и коэффициент масштаба β определяются в соответствии с [16]:

$$\begin{cases} M(x) = \alpha \cdot \beta; \\ D(x) = \alpha \cdot \beta^2. \end{cases} \quad (2.13)$$

В соответствии с тем, что при достаточно большом объеме выборки средневзвешенное значение стремится к математическому ожиданию, а выборочная дисперсия стремится к генеральной дисперсии, имеем систему уравнений:

$$\begin{cases} \bar{x} = \alpha \cdot \beta; \\ \sigma^2 = \alpha \cdot \beta^2. \end{cases} \quad (2.14)$$

Параметры α и β экспериментальных законов гамма-распределения параметров изоляции подземных электрических сетей и емкости сетей относительно земли угольных шахт и рудников определяются из системы уравнений 2.14.

После определения параметров экспериментальных законов распределения целесообразно выполнить моделирование теоретических значений вариационных рядов параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей горных предприятий с применением метода Монте-Карло. При моделировании используются квазиравномерно распределенные случайные величины, возможные значения которых имеют конечное число десятичных знаков.

Моделирование заключается в нахождении возможных значений x_i ($i \in N$) распределений параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей путем решения уравнения [44]:

$$F(x_i) = r_i, \quad (2.15)$$

где $F(x_i)$ – функция распределения параметра изоляции; r_i – случайное число, задающее вероятность.

В соответствии с выдвинутыми гипотезами законы распределения параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей угольных шахт и рудников моделируются логнормальным или гамма-законом распределениями. Функции распределения указанных законов имеют вид:

$$F(x) = \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}} dx; \quad (2.16)$$

$$F(x) = \frac{1}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)} \int_0^x x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}} dx. \quad (2.17)$$

Для проверки гипотез о виде теоретического распределения параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей угольных шахт и рудников требуется расчет наблюдаемых и определение критических значений критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова.

Для этого смоделированный вариационный ряд трансформируется в интервальный вариационный ряд и по формуле Стэрджесса (2.18) определяется оптимальное количество его интервалов и их длина (2.19)

$$n = 1 + 3,2 \log N, \quad (2.18)$$

где N – количество вариант ряда.

$$h = \frac{x_{max} - x_{min}}{n}, \text{ кОм}, \quad (2.19)$$

где x_{max} , x_{min} – соответственно максимальное и минимальное значения вариант ряда, кОм, мкФ.

Уровень значимости выбирается с целью минимизации получения ошибки первого рода, в тоже время, исключая возможность ошибки второго рода. В связи с этим уровень значимости принимается равным 0,05 (5%).

При этом критические значения критериев значимости определяются в соответствии с принятым уровнем значимости [10]:

- для критерия χ^2 -Пирсона – $\chi_{0,05}^2$;
- для критерия Колмогорова-Смирнова – $K_{0,05}$.

Нулевая гипотеза принимается, если наблюдаемое значение каждого критерия согласия меньше критического, то есть выполняется система неравенств:

$$\begin{cases} \chi_{\text{набл}}^2 \leq \chi_{0,05}^2; \\ K_{\text{набл}} \leq K_{0,05}, \end{cases} \quad (2.20)$$

В случае невыполнения системы неравенств 2.20 нулевая гипотеза не принимается.

В случае если нулевая гипотеза принимается как для одного, так и для другого из двух гипотетических законов распределения (логнормальный и гамма-закон), то вид теоретического закона распределения выбирается, исходя из неравенства:

$$K_{\text{Лнабл}} < K_{\text{Гнабл}} \quad (2.21)$$

где $K_{\text{Лнабл}}$ и $K_{\text{Гнабл}}$ – наблюдаемые значения критериев согласия Колмогорова-Смирнова для гипотетических логнормального закона и гамма-закона соответственно.

Если неравенство 2.21 выполняется, то распределение параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей угольных шахт и рудников соответствует логнормальному распределению. В противном случае ($K_{\text{Лнабл}} > K_{\text{Гнабл}}$) распределение параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей угольных шахт и рудников соответствует гамма-закону распределения. Проверка соответствия гипотетических распределений теоретическим законам только по критерию Колмогорова-Смирнова обусловлена тем, что указанный критерий более мощный, чем критерий χ^2 [16].

Статистические характеристики теоретического логнормального закона распределения определяются по выражениям [16]:

- Математическое ожидание

$$M(x) = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}. \quad (2.22)$$

- Дисперсия

$$D(x) = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}. \quad (2.23)$$

- Стандартное отклонение

$$\sigma(x) = \sqrt{(e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2}}. \quad (2.24)$$

- Коэффициент асимметрии

$$A_s = (e^{\sigma^2} + 2)\sqrt{e^{\sigma^2} - 1}. \quad (2.25)$$

- Коэффициент эксцесса

$$E_k = e^{4\sigma^2} + 2e^{3\sigma^2} + 3e^{2\sigma^2} - 6. \quad (2.26)$$

Статистические характеристики теоретического гамма-закона распределения определяются по выражениям [16]:

- Математическое ожидание

$$M(x) = \alpha \cdot \beta. \quad (2.27)$$

- Дисперсия

$$D(x) = \alpha \cdot \beta^2. \quad (2.28)$$

- Стандартное отклонение

$$\sigma(x) = \beta\sqrt{\alpha}. \quad (2.29)$$

- Коэффициент асимметрии

$$A_s = \frac{2}{\sqrt{\alpha}}. \quad (2.30)$$

- Коэффициент эксцесса

$$E_k = \frac{6}{\beta}. \quad (2.31)$$

Таким образом, в соответствии с изложенной выше методикой определяются теоретические законы распределения (вероятностные модели) параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли и их статистические характеристики.

2.3. Методика исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий

2.3.1. Исследование условий электробезопасности при прикосновении к токоведущим частям электроустановок

В соответствии с проведенным анализом электротравматизма в горнорудной и нерудной промышленности (см. главу 1) на долю электротравм, возникших при прямом прикосновении в подземных электрических сетях, приходится 84,4% от всего числа электротравм. В угольной промышленности эта доля несколько меньше и составляет 73,4%.

При исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий при прикосновении к токоведущим частям электроустановок, находящимся под напряжением, время воздействия тока на тело человека принимается в соответствии с нормативными документами, устанавливающими максимально допустимое время воздействия тока при условии работоспособности устройств автоматического отключения питания. В подземных электрических сетях угольных шахт и рудников применяется быстродействующая защита от утечек тока на землю (корпус) с автоматическим отключением питания электроустановок (за исключением цепей напряжением до 60 В).

В соответствии с вышеизложенным, максимально допустимое время воздействия тока на тело человека с учетом обеспечения условия срабатывания устройств автоматического отключения питания, равно 0,2 с [85, 86].

На рисунке 2.1 представлена схема однофазного прикосновения человека к токоведущей части электроустановки в подземной электрической сети с изолированной нейтралью угольных шахт и рудников горных предприятий.

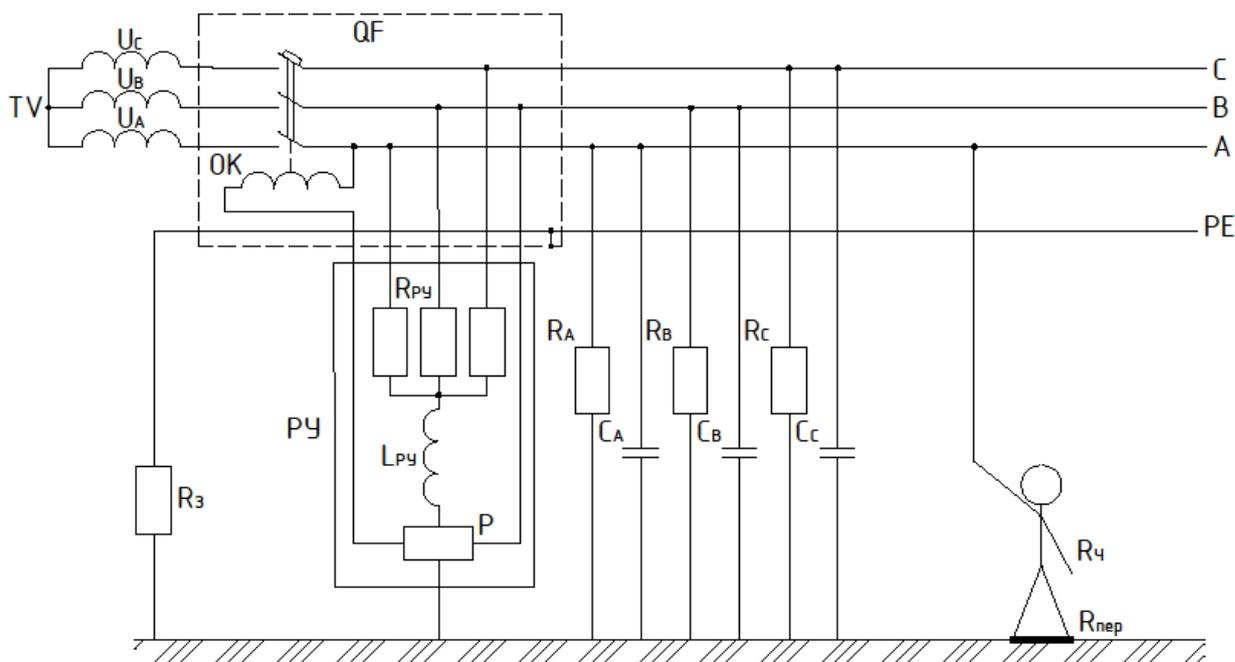


Рисунок 2.1 – Схема однофазного прикосновения человека к токоведущей части электроустановки в подземной электрической сети с изолированной нейтралью *TV* – источник питания (силовой трансформатор); U_A , U_B , U_C – фазные напряжения фаз *A*, *B* и *C* соответственно, В; *QF* – автоматический выключатель; *OK* – отключающая катушка; *PY* – реле утечки; R_{PY} – активные сопротивления *PY*, кОм; L_{PY} – индуктивность *PY*, Гн; *P* – исполнительное реле *PY*; R_A , R_B , R_C – активные сопротивления изоляции фаз *A*, *B* и *C* соответственно, кОм; C_A , C_B , C_C – емкости относительно земли фаз *A*, *B* и *C* соответственно, мкФ; R_3 – сопротивление заземляющего устройства, Ом; $R_ч$ – сопротивление тела человека, Ом; $R_{пер}$ – переходное сопротивление, кОм.

При непосредственном прикосновении человека к одной из фаз трехфазной подземной электрической сети ток через тело человека может протекать только при наличии проводимости между фазами сети и землей. В силу несовершенства изоляции между фазами и землей имеют место активные проводимости:

$$g_A = \frac{1}{R_A}; g_B = \frac{1}{R_B}; g_C = \frac{1}{R_C}, \text{ См}, \quad (2.32)$$

При определении тока через человека при прямом прикосновении имеет место реактивная проводимость фаз, обусловленная емкостью проводников относительно земли:

$$b_A = \omega C_A; b_B = \omega C_B; b_C = \omega C_C, \text{ См}, \quad (2.33)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с; f – частота питающей сети, Гц.

Для исследования влияния параметров изоляции электроустановки, которые как показано выше имеют случайный характер, на степень ее безопасности целесообразно произвести анализ выражения для величины тока, протекающего через тело человека при однофазном прикосновении к токоведущим частям электроустановки, находящимся под напряжением. Выражение для тока $I_{\text{ч}}$, протекающего в этом случае через тело человека, имеет вид:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U g_{\text{ч}}}{2} \sqrt{\frac{[3(g_B + g_C) + \sqrt{3}(b_B - b_C)]^2 + [\sqrt{3}(g_B - g_C) + 3(b_B + b_C)]^2}{(g_A + g_B + g_C + g_{\text{ч}})^2 + (b_A + b_B + b_C)^2}}, \text{ мА}, \quad (2.34)$$

где U – фазное напряжение, В; $g_{\text{ч}} = \frac{1}{R_{\text{ч}}}$ – проводимость тела человека, См.

Анализ выражения 2.25 показывает, что в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников величина тока, протекающего через тело человека при прикосновении к токоведущим частям электроустановки, обусловлена четырьмя основными параметрами:

- фазным напряжением питающей сети U ;
- сопротивлением тела человека $R_{\text{ч}}$;
- активными сопротивлениями изоляции фаз R_A, R_B, R_C ;
- емкостью фаз относительно земли C_A, C_B, C_C .

Фазное напряжение питающей сети U при определении тока через тело человека должно быть в соответствии с методическими принципами исследования, изложенными в первом параграфе настоящей главы. При исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников фазное напряжение питающей сети принимается равным 220 В.

При определении условий электробезопасности сопротивление тела человека в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников с изолированным режимом нейтрали при времени воздействия тока на организм

человека не более 0,5 с должно моделироваться резистором с сопротивлением 0,85 кОм [21]. При этом допускается отклонение от нормируемой величины в пределах $\pm 10\%$.

При исследовании условий электробезопасности при прямом прикосновении предполагается, что токи утечки в сети симметричны.

В соответствии с этим принимается, что активные и емкостные проводимости каждой фазы относительно земли равны между собой:

$$g_A = g_B = g_C = g = \frac{1}{R}, \text{ См}, \quad (2.35)$$

$$b_A = b_B = b_C = b = \omega C, \text{ См}. \quad (2.36)$$

С учетом выражений 2.35, 2.36 величина тока, протекающего через тело человека, коснувшегося фазы А (рисунок 2.1), определится по выражению:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U}{R_{\text{ч}} \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2 \cdot (1 + R^2 \omega^2 C^2)}}}, \text{ мА}. \quad (2.37)$$

Учитывая, что емкостное сопротивление изоляции фазы относительно земли определяется из выражения:

$$X = \frac{1}{\omega C}, \text{ кОм}, \quad (2.38)$$

выражение 2.37 для определения тока через человека $I_{\text{ч}}$ имеет вид:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U}{R_{\text{ч}} \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{X^2}\right)}}}, \text{ мА}. \quad (2.39)$$

Преобразуя выражение 2.39 заменой активного и емкостного сопротивлений изоляции полным сопротивлением изоляции сети и учитывая переходное сопротивление в цепи тока через тело человека $R_{\text{пер}} = r_{\text{п}} + r_{\text{об}}$, кОм ($r_{\text{п}}$ – сопротивление опорной поверхности (пола), кОм; $r_{\text{об}}$ – сопротивление обуви, кОм), выражение для определения тока через человека в подземных электрических сетях имеет вид:

$$I_{\text{ч}} = \frac{3U}{3(R_{\text{ч}} + R_{\text{пер}}) + Z}, \text{ мА}, \quad (2.40)$$

где Z – полное сопротивление изоляции сети относительно земли, кОм.

Выражение 2.40 позволяет определить минимальное значение полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей горных предприятий, при котором обеспечивается безопасное значение тока через человека ($I_{\text{ч доп}}$) при максимально допустимом времени воздействия тока (0,2 с):

$$Z_{\text{min}} = \frac{3[U - I_{\text{ч доп}}(R_{\text{ч}} + R_{\text{пер}})]}{I_{\text{ч доп}}}, \text{ кОм}. \quad (2.41)$$

Используя величину минимального значения полного сопротивления изоляции, определенного с использованием выражения 2.41, и выражения функций распределения полного сопротивления изоляции, определяются уровни обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий, при которых условия электробезопасности не обеспечиваются:

$$F_{\text{HO}}(Z) < F(Z_{\text{min}}), \quad (2.42)$$

где $F_{\text{HO}}(Z)$ – значение функции распределения для величин $Z < Z_{\text{min}}$; $F(Z_{\text{min}})$ – значение функции распределения для величины Z_{min} .

Уровни обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, при которых условия электробезопасности обеспечиваются:

$$F_{\text{O}}(Z) \geq F(Z_{\text{min}}), \quad (2.43)$$

где $F_{\text{O}}(Z)$ – значение функции распределения для величин $Z \geq Z_{\text{min}}$.

Значение $F(Z_{\text{min}})$ является границей областей, в которых условия электробезопасности не обеспечиваются (2.42) и обеспечиваются (2.43).

Поскольку параметры изоляции подземных электрических сетей горных предприятий являются случайными величинами, то ток через человека ($I_{\text{ч}}$) также является случайной величиной. В связи с принятым выше уровнем значимости

принятия нулевой гипотезы равным 5% условия, при которых электробезопасность обеспечивается соответствует уровню 95%. Значение $F_0(Z)$, определенное с использованием выражения 2.43, оценивается в соответствии с принятым уровнем значимости и делаются выводы об обеспечении условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий.

Уровни обеспечения электробезопасности, вычисленные с использованием выражения 2.43, дают представление об общем состоянии условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий и не позволяют оценивать электробезопасность по тем параметрам изоляции, на которые можно воздействовать при эксплуатации подземных электрических сетей – активное и емкостное сопротивления. Вместе с этим это не позволяет разрабатывать мероприятия по повышению уровня электробезопасности подземных электрических сетей. В этой связи целесообразно определить условия обеспечения электробезопасности в подземных электрических сетях в зависимости от активного и емкостного сопротивлений изоляции.

Вместе с этим целесообразно определить закономерности между активным и емкостным сопротивлениями изоляции. В этом случае можно определять емкость сети при активном сопротивлении изоляции, определенном с помощью измерений при проведении регламентных работ, оценив при этом условия электробезопасности путем сравнения указанной емкости с допустимой максимальной емкостью сети C_{max} .

Определение зависимости между активным и емкостным сопротивлениями изоляции подземных электрических сетей горных предприятий проведем с помощью регрессионно-корреляционного метода [13, 47]. Поскольку исследуется зависимость двух переменных – активного и емкостного сопротивлений изоляции – рассматривается парная линейная регрессия.

Активное сопротивление изоляции зависит от эксплуатационного износа электрических сетей (наличия повреждений кабелей, вызванные воздействием высоких и низких температур, щелочных и кислых вод, механическими воздействиями, загрязнением различными веществами). Емкостное сопротивление изоляции прежде всего зависит от протяженности электрических сетей и количества подключенного к сети электрооборудования.

В соответствии с вышеизложенным в качестве независимой (экзогенной) переменной, которая в большей степени определяется условиями эксплуатации, принимается активное сопротивление изоляции (R), а в качестве зависимой (эндогенной) – емкостное сопротивление изоляции (X).

Уравнение парной линейной зависимости между активным и емкостным сопротивлениями изоляции в общем виде представляется выражением:

$$X = b_0 + b_1 R, \quad (2.44)$$

где b_0 – свободный член; b_1 – коэффициент линейной зависимости.

Выражение 2.44 характеризует связь между активным и емкостным сопротивлениями изоляции подземных электрических сетей горных предприятий, которая проявляется как закономерность в среднем в целом по совокупности наблюдений.

При определении уравнения зависимости емкостного сопротивления изоляции значения активного и емкостного сопротивлений изоляции определяются с использованием теоретических интегральных законов распределения ($F = f(R)$ и $F = f(X)$).

После нахождения зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции для подземных электрических сетей целесообразно определить характеристики, дающие представление о тесноте связи между исследуемыми параметрами, и оценить статистическую значимость полученных зависимостей.

Значения параметров парных линейных зависимостей определяются по выражениям:

$$b_1 = \frac{\sum_{i=1}^n R_i X_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i \sum_{i=1}^n X_i}{\sum_{i=1}^n R_i^2 - \frac{1}{n} (\sum_{i=1}^n R_i)^2}; \quad (2.45)$$

$$b_0 = \bar{X} - b_1 \bar{R}, \quad (2.46)$$

где R_i, X_i – фактические значения активного и емкостного сопротивлений изоляции соответственно, кОм; $\bar{R} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_i$, $\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ – средние значения выборок R и X соответственно, кОм; n – объем выборки.

Определение и оценку точности зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции целесообразно проводить с использованием метода наименьших квадратов (МНК) [47]. Согласно МНК, неизвестные параметры получают таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений фактических значений X_i от теоретических значений \hat{X}_i , найденных по определяемому уравнению зависимости, была минимальной:

$$S = \sum_{i=1}^n (X_i - \hat{X}_i)^2 \rightarrow \min. \quad (2.47)$$

Теснота связи между зависимой и независимой переменными оценивается коэффициентом парной линейной корреляции (r_{RX}) и коэффициентом детерминации (R^2), которые определяются по выражениям:

$$r_{RX} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}; \quad (2.48)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \quad (2.49)$$

Коэффициент парной корреляции, являясь мерой линейной корреляционно-регрессионной зависимости между параметрами X и R , позволяет дать качественную оценку тесноты связи между емкостным и активным

сопротивлениями изоляции подземных электрических сетей горных предприятий.

Указанную оценку проведем по шкале Чеддока:

- $0 < |r_{RX}| \leq 0,3$ – связь слабая;
- $0,3 < |r_{RX}| \leq 0,5$ – связь умеренная;
- $0,5 < |r_{RX}| \leq 0,7$ – связь заметная;
- $0,7 < |r_{RX}| \leq 0,9$ – связь высокая;
- $0,9 < |r_{RX}| \leq 0,99$ – связь весьма высокая [13].

Коэффициент детерминации показывает долю вариации емкостного сопротивления изоляции, обусловленную изменением активного сопротивления изоляции. Чем ближе значение R^2 ($0 < R^2 < 1$) к единице, тем больше активное сопротивление изоляции участвует в формировании значений емкостного сопротивления изоляции.

Статистическую значимость коэффициента парной линейной корреляции определим с помощью t-критерия Стьюдента, расчетное значение которого определяется по выражению:

$$t_{\text{расч}} = \frac{r_{RX}}{\sqrt{1 - r_{RX}^2}} \sqrt{n - 2}. \quad (2.50)$$

Если $t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$ ($t_{\text{табл}}$ – значение критерия, найденное по таблице критических значений распределения Стьюдента), то с вероятностью ошибки, принятой в 5%, коэффициент парной линейной корреляции считается статистически значимым. В противном случае ($t_{\text{расч}} < t_{\text{табл}}$) коэффициент парной линейной корреляции будет считаться статистически незначимым.

Оценку математической точности уравнения зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции выполним, воспользовавшись средней относительной ошибкой аппроксимации A

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i} \right| \cdot 100\%. \quad (2.51)$$

Решение о математической точности полученного уравнения зависимости выполним с использованием выражения 2.51 по качественной шкале:

- при $A \leq 10\%$ – точность зависимости высокая;
- при $10\% < A \leq 20\%$ – точность зависимости хорошая;
- при $20\% < A \leq 50\%$ – точность зависимости удовлетворительная;
- при $A > 50\%$ – точность зависимости неудовлетворительная [47].

Проверку статистической значимости зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции в целом проведем с использованием F-критерия Фишера [47]. Расчетное значение критерия определяется по выражению:

$$F_{\text{расч}} = \frac{R^2}{1 - R^2} (n - 2). \quad (2.52)$$

В случае, если расчетное значение критерия $F_{\text{расч}}$ больше табличного значения $F_{\text{табл}}$, найденного по таблице критических значений распределения Фишера-Снедекора, то с вероятностью ошибки, принятой 5%, уравнение зависимости будет считаться в целом статистически значимым. Если расчетное значение $F_{\text{расч}}$ меньше табличного $F_{\text{табл}}$ уравнение зависимости будет считаться незначимым в целом.

Оценка статистической значимости отдельных параметров b_0 и b_1 парной линейной зависимости произведем с помощью t-критерия Стьюдента, значения которого определяются по выражениям:

$$t_{b_0} = \left| \frac{b_0}{m_{b_0}} \right|, t_{b_1} = \left| \frac{b_1}{m_{b_1}} \right|, \quad (2.53)$$

где $m_{b_0} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_1)^2}{(n-2)} \cdot \frac{\sum_{i=1}^n X_i^2}{n \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$; $m_{b_1} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X}_1)^2}{(n-2) \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}}$ – средние квадратические ошибки параметров b_0 и b_1 соответственно.

Если $t_{b_0} > t_{b \text{ табл}}$; $t_{b_1} > t_{b \text{ табл}}$ ($t_{b \text{ табл}}$ – значение критерия, найденное по таблице критических значений распределения Стьюдента), то параметры парной

линейной зависимости будут считаться статистически значимыми. В противном случае ($t_{b_0} < t_{b \text{ табл}}$; $t_{b_1} < t_{b \text{ табл}}$) параметры зависимости будут считаться статистически незначимыми.

После проведения оценок будет формулироваться вывод о статистической значимости полученных зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции и возможности использования найденных зависимостей для исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий.

Выражение для тока, протекающего через человека, в зависимости только от активного сопротивления изоляции (с использованием полученной зависимости $X = b_0 + b_1 R$) имеет вид:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U}{R_{\text{ч}} \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{(b_0 + b_1 R)^2}\right)}}, \text{ мА.} \quad (2.54)$$

Полученная зависимость тока (2.54), протекающего через тело человека, от активного сопротивления изоляции позволяет определить минимально допустимое значение активного сопротивления изоляции R_{min} , при котором ток, протекающий через тело человека, не будет превышать допустимое безопасное значение $I_{\text{ч доп}}$.

Вместе с этим целесообразно определить и максимальную емкость сети относительно земли при минимальных значениях полного и активного сопротивлений.

Поскольку активное и емкостное сопротивления изоляции каждой фазы подземных электрических сетей включены параллельно (рисунок 2.1), то выражение для определения минимального емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей, при котором будет обеспечен безопасный ток через человека, не превышающий $I_{\text{ч доп}}$, имеет вид:

$$X_{min} = \frac{R_{min}Z_{min}}{R_{min} - Z_{min}}, \text{кОм.} \quad (2.55)$$

Максимальное значение емкости подземной электрической сети определяется из выражения:

$$C_{max} = \frac{10^3}{\omega X_{min}}, \text{мкФ.} \quad (2.56)$$

Выражение 2.56 позволяет определить максимально допустимое значение емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт и рудников горных предприятий с целью оценки обеспечения уровня электробезопасности и разработки мероприятий по его повышению.

2.3.2. Исследование условий электробезопасности при прикосновении к нетоковедущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением

В соответствии с анализом электротравматизма (см. главу 1), число электротравм, возникающих при косвенном прикосновении в подземных электрических сетях, значительно меньше количества электротравм, происходящих при прямом прикосновении. Для угольной промышленности число таких травм от общего электротравматизма составляет 26,6%, для горнорудной и нерудной – 15,6%. Доля электротравм, возникающих при косвенном прикосновении, представляет значительную величину, в связи с чем вопрос обеспечения условий электробезопасности при косвенном прикосновении в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников также требует исследования.

При косвенном прикосновении к заземленным нетоковедущим частям электроустановки в сети с изолированной нейтралью (рисунок 2.2) электробезопасность обеспечивается за счет снижения напряжения на заземленных частях путем выравнивания потенциалов между корпусом и землей

(основанием) за счет увеличения потенциала земли, возникающего в результате растекания в нем тока от заземляющего устройства.

Напряжение прикосновения будет равно разности потенциалов на корпусе электроустановки (потенциал рук φ_p) и на земле или основании (потенциал ног φ_n) и определится по выражению:

$$U_{\text{пр}} = \varphi_p - \varphi_n = \varphi_p \left(1 - \frac{\varphi_n}{\varphi_p} \right), \text{ В.} \quad (2.57)$$

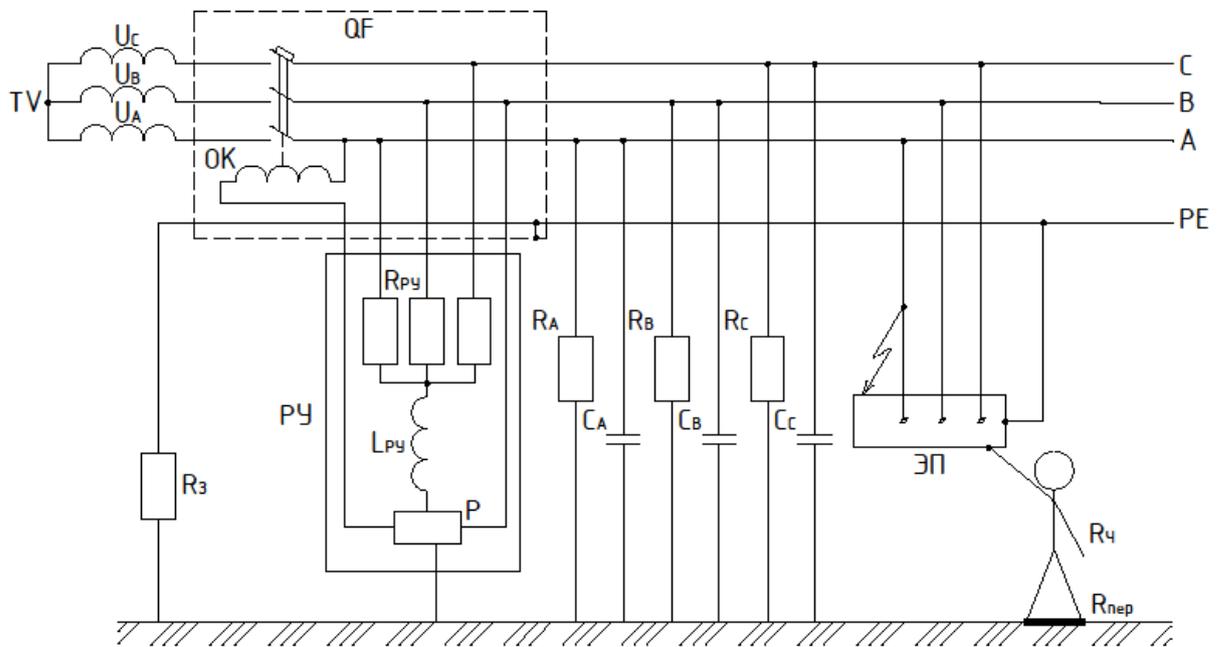


Рисунок 2.2 – Схема косвенного прикосновения человека в сети с изолированной нейтралью

TV – источник питания (силовой трансформатор); U_A, U_B, U_C – фазные напряжения фаз A, B и C соответственно, В; QF – автоматический выключатель; OK – отключающая катушка; $PУ$ – реле утечки; $R_{PУ}$ – активные сопротивления $PУ$, кОм; $L_{PУ}$ – индуктивность $PУ$, Гн; P – исполнительное реле $PУ$; R_A, R_B, R_C – активные сопротивления изоляции фаз A, B и C соответственно, кОм; C_A, C_B, C_C – емкости относительно земли фаз A, B и C соответственно, мкФ; $R_з$ – сопротивление заземляющего устройства, Ом; $R_ч$ – сопротивление тела человека, Ом; $R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление, кОм; $ЭП$ – аварийный электроприемник.

Потенциал рук равен потенциалу на корпусе относительно земли (U_K):

$$\varphi_p = U_k = I_3 R_3, \text{ В}, \quad (2.58)$$

где I_3 – ток, протекающий через заземляющее устройство, А; R_3 – сопротивление заземляющего устройства, Ом.

С учетом изложенного напряжение прикосновения имеет вид:

$$U_{\text{пр}} = I_3 R_3 \alpha_1 \alpha_2, \text{ В}, \quad (2.59)$$

где $\alpha_1 = 1 - \frac{\varphi_H}{\varphi_p}$ – коэффициент напряжения прикосновения;

$\alpha_2 = \frac{R_{\text{ч}}}{R_{\text{ч}} + r_{\text{п}} + r_{\text{об}}}$ – коэффициент сопротивления цепи тока через тело человека.

Ток, протекающий через заземляющее устройство, определяется по выражению:

$$I_3 = \frac{3U}{3R_3 + Z}, \text{ мА}. \quad (2.60)$$

В соответствии с изложенным выше, выражение для определения тока, протекающего через тело человека при косвенном прикосновении в сети с изолированной нейтралью, имеет вид:

$$I_{\text{ч}} = \frac{3UR_3 \alpha_1 \alpha_2 10^3}{R_{\text{ч}}(3R_3 + Z)}, \text{ мА}. \quad (2.61)$$

Выражение 2.61 позволяет определить ток, протекающий через тело человека, при косвенном прикосновении в подземных электрических сетях горных предприятий.

Анализ выражения 2.61 показывает, что ток, протекающий через тело человека при прикосновении к нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением, будет уменьшаться с уменьшением сопротивления заземляющего устройства. Поэтому для обеспечения условий электробезопасности при косвенном прикосновении в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий требуется обеспечение значения сопротивления заземляющего устройства, не превышающего нормируемое.

Значение тока, полученное с использованием выражения 2.61, должно сравниваться с длительно допустимым безопасным значением тока ($I_{ч\text{ дл. доп}}$) с целью выработки рекомендаций по обеспечению условий безопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий.

2.4. Выводы

В результате обоснования методических положений исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий:

1. Обоснованы методические принципы исследования электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий, а именно:

- статистическое исследование параметров изоляции как случайных величин должно основываться на массово-типичных данных, анализ которых требуется проводить с применением методов теории вероятности и математической статистики;

- при моделировании воздействия электрического тока на организм человека необходимо учитывать сопровождающие его факторы:

- величину тока, которую необходимо определять с учетом активного сопротивления изоляции и емкости фаз сети относительно земли, включенных последовательно в цепь тока, протекающего через человека;
- путь тока через тело человека, связанный со схемами включения человека в электроустановку;
- продолжительность воздействия тока;
- сопротивление тела человека;

- при исследовании условий электробезопасности напряжение электрической сети должно соответствовать стандартным величинам напряжений.

2. Разработана методика исследования параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников горных предприятий, включающая:

- методику определения статистических характеристик параметров изоляции как случайных величин, в основу которой положены статистические данные, обработку которых целесообразно проводить с использованием аппарата теории вероятности и математической статистики;

- методику моделирования вероятностных законов распределения параметров изоляции, основанную на использовании метода Монте-Карло.

3. Разработана методика исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, включающая:

- методику исследования условий электробезопасности при прикосновении к токоведущим частям электроустановок. Для установления зависимостей между параметрами изоляции подземных электрических сетей целесообразно использовать методы эконометрики – регрессионный и корреляционный анализы;

- методику исследования условий электробезопасности при прикосновении к нетоковедущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением.

Разработанные в настоящей главе методические положения позволяют выполнить исследования: параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников горных предприятий как основного средства обеспечения электробезопасности; условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

Глава 3. Исследование состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий

3.1. Исходные положения

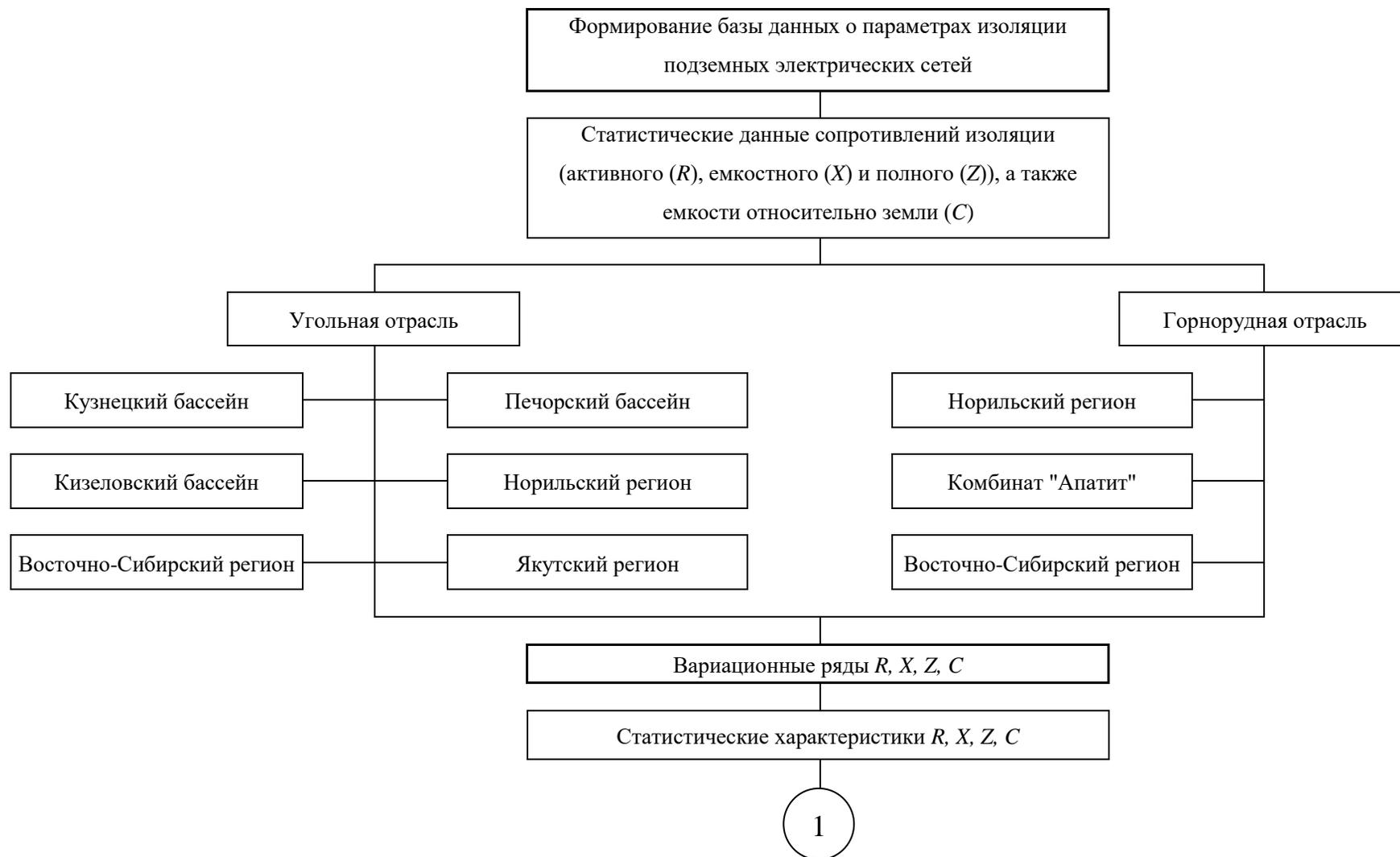
Исследования состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий выполнены в соответствии с разработанными во второй главе методическими принципами.

Исследование выполнено на основе исходных статистических данных о активном (R), емкостном (X), полном (Z) сопротивлениях изоляции и емкости (C) подземных электрических сетей относительно земли предприятий угольной промышленности (предприятия Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, а также Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов), а также предприятий рудной и нерудной отраслей (предприятия Норильского региона и Восточной Сибири, а также комбинат «Апатит»), в виде полигонов распределений вышеуказанных величин [94, 106].

На рисунке 3.1 представлена блок-схема исследования состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий. Представленная на рисунке блок-схема отражает порядок исследования активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости фаз относительно земли в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горнопромышленных районов, принятых к анализу.

Разработанная блок-схема универсальна и не ограничена в применении только к указанным районам.

Конечным результатом исследования являются вероятностные модели активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкость фаз относительно земли, которые следует использовать при анализе электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.



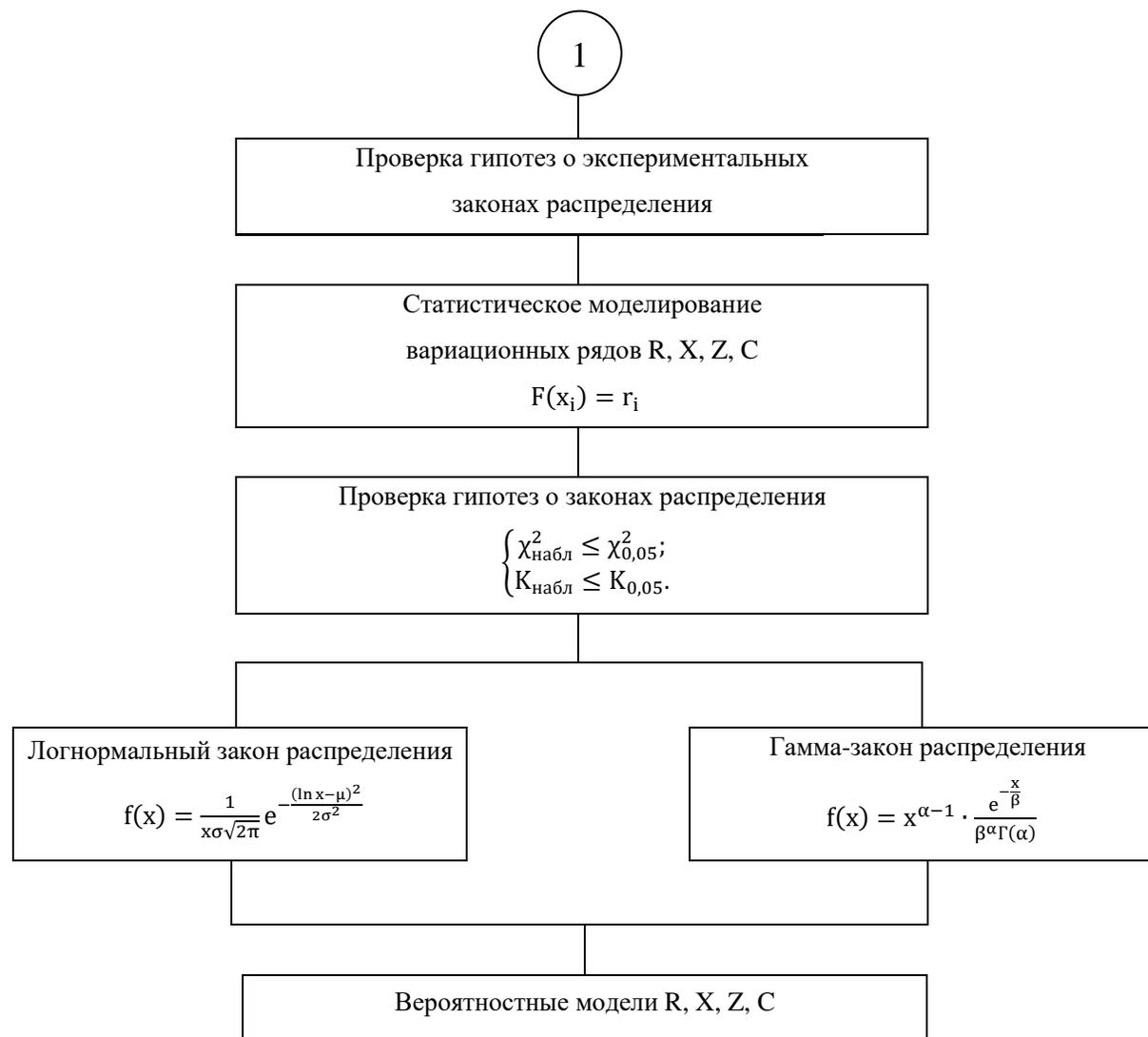


Рисунок 3.1 – Блок-схема исследования состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий

3.2. Статистические характеристики параметров изоляции подземных электрических сетей

3.2.1. Статистические характеристики параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Исследование параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей угольных шахт проведено для предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, а также Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов.

Подробное описание исследования приведено для шахт Кузнецкого бассейна. Для других бассейнов и регионов приведены только основные результаты исследования, тогда как промежуточные результаты приведены в приложениях.

Для определения статистических характеристик параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Кузнецкого бассейна сформированы вариационные интервальные ряды, приведенные в таблицах 3.1-3.4.

Интервальные вариационные ряды активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости шахтных электрических сетей Печорского и Кизеловского бассейнов, а также Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов, представлены в таблицах Приложения А.

Экспериментальные статистические характеристики (средневзвешенное значение, дисперсия, стандартное отклонение, медиана, нижний и верхний квартили) активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей угольных шахт Кузнецкого бассейна, определенные в соответствии с методикой исследования (п. п. 2.1, 2.2.1), приведены в таблицах 3.5-3.8.

Таблица 3.1 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кузнецкого бассейна

Интервалы активного сопротивления изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0,1-4	0,1	4,0	2,0	0,409	0,82	7,65
4,1-8	4,1	8,0	6,0	0,305	1,83	0,03
8,1-12	8,1	12,0	10,0	0,163	1,63	2,20
12,1-16	12,1	16,0	14,0	0,042	0,59	2,48
16,1-20	16,1	20,0	18,0	0,081	1,46	11,04
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 6,32$	$\sigma_R^2 = 23,4$

Таблица 3.2 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кузнецкого бассейна

Интервалы емкостного сопротивления изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0,1-3	0,1	3,0	1,5	0,467	0,70	3,96
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,274	1,23	0,0
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,145	1,09	1,38
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,066	0,69	2,45
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,032	0,43	2,64
15,1-18	15,1	18,0	16,5	0,016	0,26	2,34
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 4,41$	$\sigma_X^2 = 12,77$

Таблица 3.3 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кузнецкого бассейна

Интервалы полного сопротивления изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0,1-2	0,1	2,0	1,0	0,310	0,31	2,23
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,345	1,04	0,16

Продолжение таблицы 3.3

Интервалы полного сопротивл ения изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,182	0,91	0,32
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,055	0,39	0,61
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,072	0,65	2,04
10,1-12	10,1	12,0	11,0	0,036	0,4	1,93
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 3,68$	$\sigma_Z^2 = 7,28$

Таблица 3.4 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Кузнецкого бассейна

Интервалы емкости относител ьно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,01-0,5	0,01	0,5	0,25	0,262	0,064	0,241
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,262	0,195	0,055
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,169	0,210	0,000
1,51-2,0	1,51	2,0	1,75	0,092	0,161	0,027
2,01-2,5	2,01	2,5	2,25	0,108	0,242	0,117
2,51-3,0	2,51	3,0	2,75	0,062	0,170	0,147
3,01-3,5	3,01	3,5	3,25	0,015	0,049	0,062
3,51-4,0	3,51	4,0	3,75	0,030	0,112	0,194
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 1,2$	$\sigma_C^2 = 0,84$

Таблица 3.5 – Статистические характеристики активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно- Сибирский регион	Якутский регион
Средневзвешенное значение, кОм	6,32	7,75	6,35	9,6	5,56	7,88
Дисперсия, кОм ²	23,4	24,87	25,48	18,02	8,94	25,73

Продолжение таблицы 3.5

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Стандартное отклонение, кОм	4,84	4,99	5,05	4,25	2,99	5,07
Медиана, кОм	5,19	6,85	5,03	8,99	5,36	7,5
Нижний квартиль, кОм	2,45	3,97	2,44	6,12	3,0	3,0
Верхний квартиль, кОм	8,88	10,7	7,91	12,71	7,84	12,0

Анализируя таблицу 3.5, следует отметить определенный разброс средневзвешенных значений активного сопротивления. Наименьшее его значение (5,56 кОм) наблюдается в электрических сетях шахт Восточно-Сибирского региона, наибольшее (9,6 кОм) – в сетях шахт Норильского региона. Разброс обусловлен различием горно-геологических и производственно-технологических условий.

Наибольшие значения дисперсии (25,73 кОм²) и стандартного отклонения (5,07 кОм) имеют место в электрических сетях шахт Якутского региона.

Наименьшие значения дисперсии (8,94 кОм²) и стандартного отклонения (2,99 кОм) наблюдаются в электрических сетях шахт Восточно-Сибирского региона.

Медианы активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей анализируемых горнопромышленных районов меньше величин средневзвешенных значений. Это позволяет предположить, что распределения активного сопротивления подземных электрических сетей угольных шахт отличны от нормального закона.

Таблица 3.6 – Статистические характеристики емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Средневзвешенное значение, кОм	4,41	4,29	3,14	3,35	3,65	4,2
Дисперсия, кОм ²	10,43	8,96	8,8	5,18	9,03	5,76
Стандартное отклонение, кОм	3,23	2,99	2,97	2,28	3,01	2,4
Медиана, кОм	3,36	2,73	2,34	2,61	2,82	4,0
Нижний квартиль, кОм	1,61	1,37	1,17	1,21	1,41	2,33
Верхний квартиль, кОм	6,19	5,48	4,19	4,81	4,9	5,67

Анализируя средневзвешенные значения емкостного сопротивления изоляции по данным таблицы 3.6, можно отметить относительную равномерность их значений относительно значений активного сопротивления. Наибольшее значение (4,41 кОм) отмечается в электрических сетях шахт Кузнецкого бассейна, наименьшее (3,14 кОм) – в подземных сетях Кизеловского бассейна.

Разброс стандартных отклонений емкостного сопротивления не превышает 1 кОм, что свидетельствует о стабильности производства горных работ – несущественно изменяющимися протяженностью подземных электрических сетей и количеством подключенного электрооборудования, и, соответственно, практически неизменяющейся емкостью подземных электрических сетей.

Значения медиан вариационных рядов емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей в условиях угольных шахт рассматриваемых горнопромышленных районов отличаются от величин средневзвешенных значений. Это позволяет предположить, что распределения емкостного сопротивления изоляции шахтных электрических сетей не описываются нормальным законом.

Таблица 3.7 – Статистические характеристики полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Средневзвешенное значение, кОм	3,68	3,77	2,71	3,19	2,0	3,55
Дисперсия, кОм ²	7,28	13,76	4,99	6,47	1,87	3,03
Стандартное отклонение, кОм	2,7	3,71	2,23	2,54	1,37	1,74
Медиана, кОм	3,1	2,58	2,2	2,56	1,61	3,4
Нижний квартиль, кОм	1,61	1,29	1,08	1,19	1,0	2,3
Верхний квартиль, кОм	5,04	4,88	3,56	4,49	3,0	4,85

Анализ таблицы 3.7 показывает, что характер изменения средневзвешенных значений, а также дисперсий и стандартных отклонений полного сопротивления изоляции схож с активным сопротивлением. Это обусловлено зависимостью полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей как от активной составляющей, так и от емкостной.

Наименьшая величина средневзвешенного значения (2,0 кОм), дисперсии (1,87 кОм²) и стандартного отклонения (1,37 кОм) имеют место в электрических сетях угольных шахт Восточно-Сибирского региона. Наибольшие значения соответствующих параметров наблюдаются в подземных сетях Печорского бассейна.

Медианы интервальных вариационных рядов полного сопротивления изоляции шахтных электрических сетей анализируемых горнопромышленных районов меньше величины средневзвешенного значения. Это обстоятельство позволяет предположить, что законы распределения полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт отличны от нормального закона.

Таблица 3.8 – Статистические характеристики емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Средневзвешенное значение, мкФ	1,20	1,43	1,62	1,47	3,41	0,79
Дисперсия, мкФ ²	0,84	1,18	1,14	0,58	2,89	0,11
Стандартное отклонение, мкФ	0,92	1,09	1,07	0,76	1,70	0,33
Медиана, мкФ	0,95	1,16	1,36	1,36	3,26	0,79
Нижний квартиль, мкФ	0,48	0,60	0,86	0,91	1,96	0,56
Верхний квартиль, мкФ	1,81	1,96	2,12	1,94	5,08	1,04

Анализ данных, представленных в таблице 3.8, показал, что емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов и Норильского регионов распределены относительно равномерно. При этом величины дисперсии и стандартного отклонения емкости подземных электрических сетей указанных горнопромышленных районов имеют существенные отличия. Это указывает на существенную вариабельность емкости подземных сетей указанных районов, которая обусловлена существенными различиями подземных электрических сетей.

Наибольшие значения статистических характеристик емкости наблюдаются для подземных электрических сетей предприятий Восточно-Сибирского региона.

Наименьшие значения статистических характеристик емкости наблюдаются для подземных электрических сетей предприятий Якутского региона.

Графические интерпретации результатов исследования статистических характеристик подземных электрических сетей угольных шахт Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов представлены на рисунке 3.2 в виде диаграмм размаха.

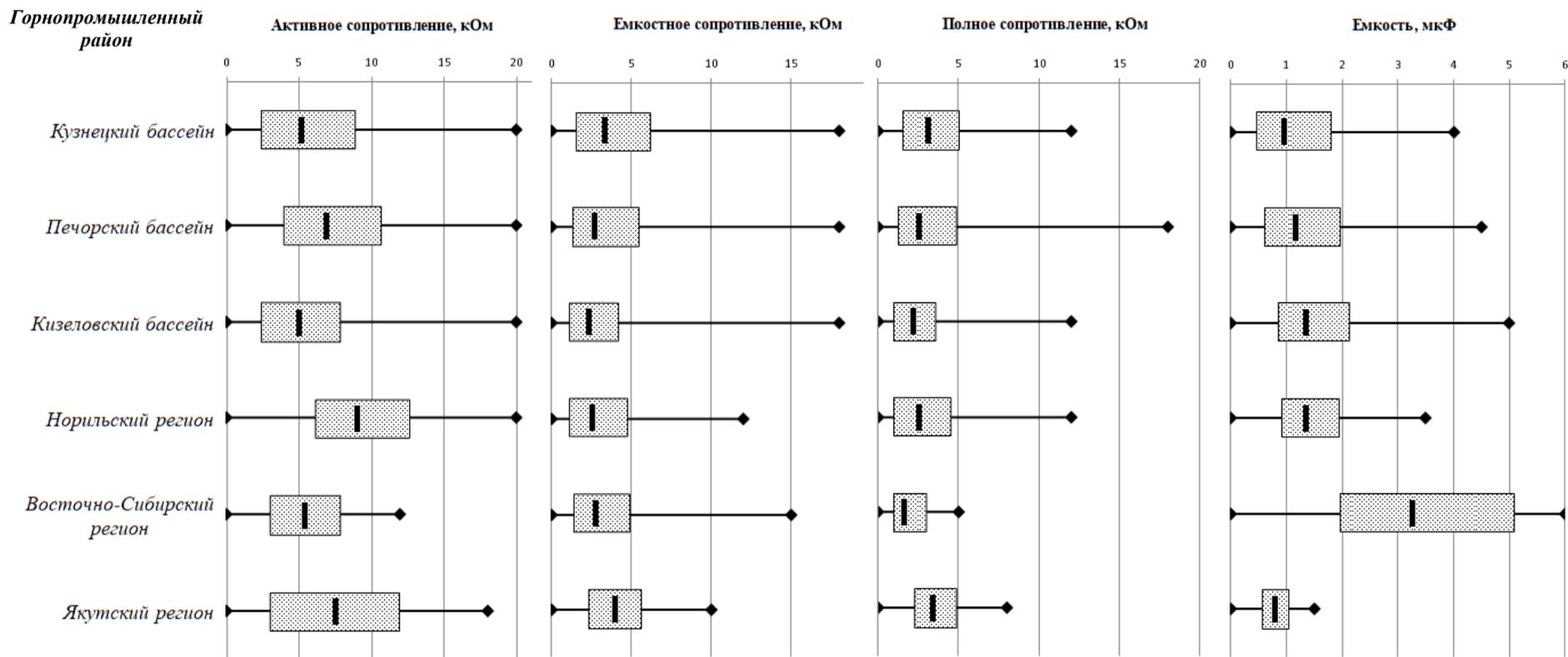


Рисунок 3.2 – Диаграммы размаха статистических характеристик активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт

◆ / ◆ – минимальное/максимальное значение; – интерквартильный размах; | – медиана

Анализ диаграмм размаха, представленных на рисунке 3.2, показывает, что для всех параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт рассматриваемых горнопромышленных районов наблюдается различие минимального и максимального значений параметра. Резко выраженная левая асимметрия интерквартильных размахов вместе с асимметричностью медианы относительно нижнего и верхнего квартилей позволяют сделать вывод, что распределения активного, емкостного, полного сопротивления изоляции и емкости шахтных электрических сетей относительно земли Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов не соответствуют нормальному закону распределения.

В соответствии с изложенным выдвигаются гипотезы о принадлежности параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт к теоретическим распределениям, для которых характерны указанные признаки – логнормальному закону распределения и гамма-распределению.

3.2.2. Статистические характеристики параметров изоляции подземных электрических сетей рудников

Исследование параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей рудников проведено для предприятий Норильского и Восточно-Сибирского регионов, а также комбината «Апатит».

Подробное описание исследования приведено для рудников Норильского региона. Для других регионов приведены только основные результаты исследования, тогда как промежуточные результаты приведены в приложениях.

Для определения статистических характеристик параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей рудников Норильского региона

сформированы вариационные интервальные ряды, приведенные в таблицах 3.9-3.12.

Интервальные вариационные ряды активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости рудничных электрических сетей относительно земли Восточно-Сибирского региона и комбината "Апатит" представлены в таблицах приложения Б.

Экспериментальные статистические характеристики (средневзвешенное значение, дисперсия, стандартное отклонение, медиана, нижний и верхний квартили) активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей рудников Норильского региона, определенные в соответствии с методикой исследования (п. п. 2.1, 2.2.1), приведены в таблицах 3.13-3.16.

Таблица 3.9 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников Норильского региона

Интервалы активного сопротивл ения изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0,1-4	0,1	4,0	2,0	0,115	0,23	5,2
4,1-8	4,1	8,0	6,0	0,429	2,57	3,18
8,1-12	8,1	12,0	10,0	0,229	2,29	0,37
12,1-16	12,1	16,0	14,0	0,114	1,6	3,17
16,1-20	16,1	20,0	18,0	0,113	2,03	9,72
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 8,72$	$\sigma_R^2 = 21,65$

Таблица 3.10 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников Норильского региона

Интервалы емкостного сопротивления изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0,1-2	0,1	2,0	1,0	0,378	0,38	2,24
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,289	0,87	0,06
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,178	0,89	0,44
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,090	0,63	1,14
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,022	0,2	0,68
10,1-12	10,1	12,0	11,0	0,043	0,47	2,46
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 3,44$	$\sigma_X^2 = 7,02$

Таблица 3.11 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников Норильского региона

Интервалы полного сопротивления изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0,1-2	0,1	2,0	1,0	0,370	0,37	1,6
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,348	1,04	0,0
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,174	0,87	0,64
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,087	0,61	1,34
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,021	0,19	0,74
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 3,08$	$\sigma_Z^2 = 4,32$

Таблица 3.12 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников Норильского региона

Интервалы емкости относительно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,01-0,5	0,01	0,5	0,25	0,133	-1,111	0,164
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,311	-0,611	0,116
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,157	-0,111	0,002

Продолжение таблицы 3.12

Интервалы емкости относительно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частота P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
1,51-2,0	1,51	2,0	1,75	0,133	0,390	0,020
2,01-2,5	2,01	2,5	2,25	0,133	0,890	0,105
2,51-3,0	2,51	3,0	2,75	0,133	1,390	0,257
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 1,36$	$\sigma_C^2 = 0,66$

Таблица 3.13 – Статистические характеристики активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат «Апатит»	Восточно-Сибирский регион
Средневзвешенное значение, кОм	8,72	3,4	5,5
Дисперсия, кОм ²	21,65	3,35	17,22
Стандартное отклонение, кОм	4,65	1,83	4,15
Медиана, кОм	7,59	3,33	4,59
Нижний квартиль, кОм	5,26	2,0	2,23
Верхний квартиль, кОм	11,6	4,8	7,46

Анализируя таблицу 3.13, можно отметить, что средневзвешенные значения активного сопротивления подземных электрических сетей рудников имеют разброс. Наименьшее значение (3,4 кОм) отмечается в электрических сетях комбината «Апатит», а наибольшее (8,72 кОм) – в рудничных сетях Норильского региона.

Наименьшие значения дисперсии (3,35 кОм²) и стандартного отклонения (1,83 кОм) имеют место в подземных электрических сетях комбината «Апатит». В рудничных сетях Норильского и Восточно-Сибирского регионов, несмотря на различие средневзвешенных значений, величины стандартных отклонений практически одинаковы.

Медиана вариационных рядов активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников не совпадает со средневзвешенным значением, что свидетельствует об имеющейся асимметрии.

Таблица 3.14 – Статистические характеристики емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат «Апатит»	Восточно-Сибирский регион
Средневзвешенное значение, кОм	3,44	1,71	6,36
Дисперсия, кОм ²	7,02	0,92	18,86
Стандартное отклонение, кОм	2,65	0,96	4,34
Медиана, кОм	2,84	1,55	5,35
Нижний квартиль, кОм	1,32	1,14	2,77
Верхний квартиль, кОм	4,93	1,95	9,74

Анализ таблицы 3.14 показывает, что наибольшее средневзвешенное значение (6,36 кОм) емкостного сопротивления соответствует подземным электрическим сетям Восточно-Сибирского региона. Это свидетельствует о небольшой протяженности сетей, и, следовательно, их малой емкости. В рудничных сетях комбината "Апатит" наблюдается наименьшая величина средневзвешенного значения (1,71 кОм), что связано с их большей емкостью.

Наибольшие значения дисперсии (18,86 кОм²) и стандартного отклонения (4,34 кОм) присущи подземным электросетям Восточно-Сибирского региона, наименьшие (0,92 кОм² и 0,96 кОм соответственно) – рудничным сетям комбината "Апатит".

Значение медиан интервальных рядов емкостного сопротивления изоляции рудничных сетей меньше величин их средневзвешенных значений. Это свидетельствует о левосторонней асимметрии значений емкостного сопротивления изоляции рудничных электрических сетей рассматриваемых районов.

Таблица 3.15 – Статистические характеристики полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Средневзвешенное значение, кОм	3,08	1,5	4,83
Дисперсия, кОм ²	4,32	1,42	16,26
Стандартное отклонение, кОм	2,08	1,19	4,03
Медиана, кОм	2,75	1,29	3,33
Нижний квартиль, кОм	1,35	0,7	1,58
Верхний квартиль, кОм	4,37	1,79	7,71

Из таблицы 3.15 следует, что средневзвешенные значения полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников имеют определенный разброс. Наибольшее значение (4,83 кОм) соответствует подземным сетям Восточно-Сибирского региона, наименьшее (1,5 кОм) – рудничным электрическим сетям комбината "Апатит".

Наименьшее значение стандартного отклонения (1,42 кОм) наблюдается в рудничных сетях комбината "Апатит", наибольшие значения дисперсии (16,26 кОм²) и стандартного отклонения (4,03 кОм) соответствуют подземным электрическим сетям Восточно-Сибирского региона.

Для рядов полного сопротивления изоляции рудничных электросетей, также как для интервальных рядов активного и емкостного сопротивлений, характерна левосторонняя асимметрия, что обусловлено меньшими, по сравнению со средневзвешенными значениями, величинами медиан.

Таблица 3.16 – Статистические характеристики емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Средневзвешенное значение, мкФ	1,36	2,16	0,81
Дисперсия, мкФ ²	0,66	0,70	0,79

Продолжение таблицы 3.16

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Стандартное отклонение, мкФ	0,81	0,84	0,89
Медиана, мкФ	1,18	2,20	0,57
Нижний квартиль, мкФ	0,69	1,80	0,27
Верхний квартиль, мкФ	2,06	2,74	1,07

Анализируя представленные в таблице 3.16 данные можно отметить, что средневзвешенные значения емкости рудничных подземных электрических сетей предприятий Норильского и Восточно-Сибирского регионов, а также комбината «Апатит» имеют существенный разброс. Наибольшее значение наблюдается для подземных электрических сетей комбината «Апатит» (2,16 мкФ), наименьшее – для подземных электрических сетей Восточно-Сибирского региона (0,81 мкФ). Разброс обусловлен различием в технологиях добычи и конструкциях электрических сетей предприятий.

Однако стоит отметить, что дисперсии и стандартные отклонения емкости подземных электрических сетей указанных районов различаются не существенно: дисперсии изменяются в пределах 0,66-0,79 мкФ², стандартные отклонения – в пределах 0,81-0,89 мкФ. Небольшой разброс указанных значений соответствует слабой изменчивости емкостей рудничных подземных электрических сетей предприятий анализируемых районов и в целом стабильности технологических условий.

Графические интерпретации статистических характеристик активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников Норильского и Восточно-Сибирского регионов, а также комбината "Апатит" представлены на рисунке 3.3 в виде диаграмм размаха.

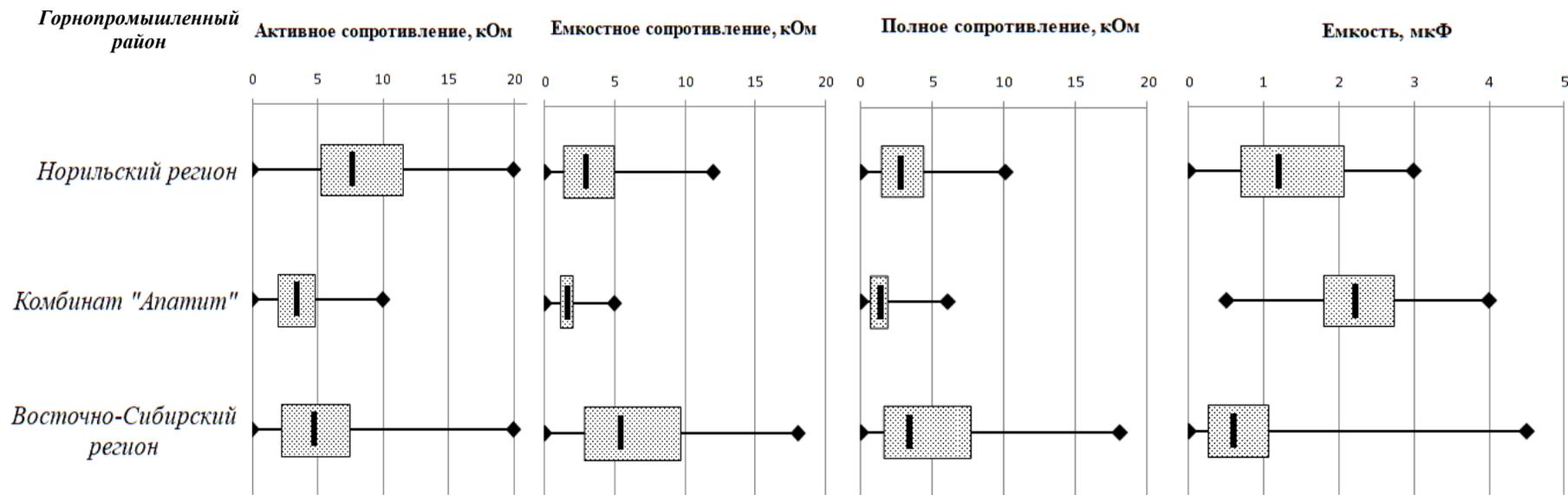


Рисунок 3.3 – Диаграммы размаха статистических характеристик активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости относительно земли рудничных подземных электрических сетей

◆ — / —◆ — минимальное/максимальное значение; [] — интерквартильный размах; | — медиана

Анализ диаграмм, представленных на рисунке 3.3, показывает, что для всех параметров изоляции и емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли рассматриваемых горнопромышленных районов характерен разброс минимального и максимального значений. Также отмечается различие интерквартильных размахов, их резко выраженная левосторонняя асимметрия и нецентральность медианы относительно нижнего и верхнего квартилей. Вышеизложенное позволяет предположить, что распределения активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли не относятся к нормальному закону распределения.

В соответствии с изложенным выдвигаются гипотезы о принадлежности параметров изоляции и емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли к теоретическим распределениям, для которых характерны указанные признаки – логнормальному закону распределения и гамма-распределению.

3.3. Вероятностные законы распределения параметров изоляции подземных сетей

3.3.1. Исходные положения

Вероятностные законы распределения активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости относительно земли подземных электрических сетей горных предприятий угольной и рудной отраслей определялись в соответствии с методикой, изложенной в главе 2 (п. п. 2.1, 2.2.2). Законы распределения параметров изоляции, а также емкости относительно земли, базируются на их статистических характеристиках, полученных в п. 3.2.

3.3.2. Вероятностные законы распределения параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Расчетные параметры законов распределения активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости шахтных электрических сетей относительно земли, вычисленные с использованием метода моментов (2.12, 2.14), представлены в таблице 3.17.

Таблица 3.17 – Параметры экспериментальных законов распределения активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости шахтных электрических сетей относительно земли

Вид экспериментального закона распределения	Параметр	Горнопромышленный район					
		Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Активное сопротивление изоляции							
Логнормальное распределение	μ	1,61	1,88	1,6	2,17	1,59	1,89
	σ^2	0,46	0,35	0,49	0,18	0,25	0,35
Гамма-распределение	α	1,71	2,42	1,58	5,12	3,46	2,41
	β	3,7	3,21	4,01	1,88	1,61	3,27
Емкостное сопротивление изоляции							
Логнормальное распределение	μ	1,23	1,12	0,83	0,96	1,03	1,29
	σ^2	0,5	0,67	0,64	0,5	0,52	0,28
Гамма-распределение	α	1,52	1,04	1,12	1,52	1,47	3,06
	β	2,9	4,14	2,8	2,21	2,48	1,37
Полное сопротивление изоляции							
Логнормальное распределение	μ	1,09	0,99	0,74	0,91	0,5	1,16
	σ^2	0,44	0,67	0,52	0,49	0,38	0,21
Гамма-распределение	α	1,87	1,03	1,47	1,57	2,13	4,18
	β	1,98	3,65	1,84	2,03	0,94	0,85
Емкость							
Логнормальное распределение	μ	-0,04	0,13	0,3	0,27	1,12	-0,32
	σ^2	0,46	0,45	0,36	0,24	0,22	0,16
Гамма-распределение	α	1,72	1,74	2,29	3,73	4,03	5,58
	β	0,7	0,82	0,71	0,39	0,85	0,14

Приведенные в таблице 3.17 данные характеризуют параметры экспериментальных законов распределения активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости сетей, и являются основой для проверки статистических гипотез о виде теоретических законов распределения.

Теоретические законы функции распределения параметров изоляции, а также емкости подземных электрических сетей угольных шахт, определены с применением данных таблицы 3.17.

Проверка гипотез о законах распределения выполнена с помощью критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова (2.20). Указанные законы приведены в таблицах 3.18-3.21.

Таблица 3.18 – Функции распределения активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Кузнецкий бассейн	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,7R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 1,61)^2}{0,92}} dR$	1,86	7,82	0,05	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{8,52} \int_0^R R^{0,71} e^{-\frac{R}{3,7}} dR$	7,41		0,1	
Печорский бассейн	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,48R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 1,88)^2}{0,7}} dR$	3,51	7,82	0,034	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{21,17} \int_0^R R^{1,42} e^{-\frac{R}{3,21}} dR$	2,73		0,043	
Кизеловский бассейн	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,75R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 1,6)^2}{0,98}} dR$	1,79	7,82	0,032	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{8} \int_0^R R^{0,58} e^{-\frac{R}{4,01}} dR$	2,04		0,033	
Норильский регион	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,06R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 2,17)^2}{0,36}} dR$	7,82	5,99	0,085	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{729,59} \int_0^R R^{4,12} e^{-\frac{R}{1,88}} dR$	1,96		0,049	

Продолжение таблицы 3.18

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,25R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 1,59)^2}{0,5}} dR$	6,46	7,82	0,048	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{16,53} \int_0^R R^{2,46} e^{-\frac{R}{1,61}} dR$	5,00		0,075	
Якутский регион	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,48R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 1,89)^2}{0,7}} dR$	2,98	7,82	0,042	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{21,73} \int_0^R R^{1,41} e^{-\frac{R}{3,27}} dR$	2,51		0,039	

Таблица 3.19 – Функции распределения емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Кузнецкий бассейн	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{1,77X} \int_{-\infty}^X e^{-(\ln X - 1,23)^2} dX$	5,52	7,82	0,05	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{4,47} \int_0^X X^{0,52} e^{-\frac{X}{2,9}} dX$	1,28		0,021	
Печорский бассейн	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{2,05X} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(\ln X - 1,12)^2}{1,34}} dX$	0,2	5,99	0,014	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{4,29} \int_0^X X^{0,04} e^{-\frac{X}{4,14}} dX$	2,14		0,04	
Кизеловский бассейн	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{2,01X} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(\ln X - 0,83)^2}{1,28}} dX$	9,16	7,82	0,086	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{2,99} \int_0^X X^{0,12} e^{-\frac{X}{2,8}} dX$	5,65		0,058	
Норильский регион	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{1,77X} \int_{-\infty}^X e^{(\ln X - 0,96)^2} dX$	5,3	7,82	0,059	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{2,96} \int_0^X X^{0,52} e^{-\frac{X}{2,21}} dX$	2,65		0,057	

Продолжение таблицы 3.19

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi_{\text{набл}}^2$	$\chi_{0,05}^2$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{1,81X} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(\ln X - 1,03)^2}{1,04}} dX$	2,51	7,82	0,039	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{3,37} \int_0^X X^{0,47} e^{-\frac{X}{2,48}} dX$	2,66		0,029	
Якутский регион	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{1,33X} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(\ln X - 1,29)^2}{0,56}} dX$	4,46	9,49	0,086	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{5,54} \int_0^X X^{2,06} e^{-\frac{X}{1,37}} dX$	8,41		0,086	

Таблица 3.20 – Функции распределения полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi_{\text{набл}}^2$	$\chi_{0,05}^2$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Кузнецкий бассейн	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,66Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 1,09)^2}{0,88}} dZ$	11,8	5,99	0,084	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{3,41} \int_0^Z Z^{0,87} e^{-\frac{Z}{1,98}} dZ$	3,89		0,087	
Печорский бассейн	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{2,05Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 0,99)^2}{1,34}} dZ$	6,39	7,82	0,068	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{3,73} \int_0^Z Z^{0,03} e^{-\frac{Z}{3,65}} dZ$	9,91		0,094	
Кизеловский бассейн	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,81Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 0,74)^2}{1,04}} dZ$	5,88	7,82	0,088	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{2,17} \int_0^Z Z^{0,47} e^{-\frac{Z}{1,84}} dZ$	10,5		0,077	
Норильский регион	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,75Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 0,91)^2}{0,98}} dZ$	7,65	7,82	0,081	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{2,71} \int_0^Z Z^{0,57} e^{-\frac{Z}{2,03}} dZ$	3,04		0,064	

Продолжение таблицы 3.20

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,55Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 0,5)^2}{0,76}} dZ$	9,24	5,99	0,065	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{0,93} \int_0^Z Z^{1,13} e^{-\frac{Z}{0,94}} dZ$	2,85		0,054	
Якутский регион	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,15Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 1,16)^2}{0,42}} dZ$	4,78	7,82	0,053	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{3,83} \int_0^Z Z^{3,18} e^{-\frac{Z}{0,85}} dZ$	9,69		0,094	

Таблица 3.21 – Функции распределения емкости подземных электрических сетей угольных шахт относительно земли

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Кузнецкий бассейн	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{1,7C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C + 0,04)^2}{0,92}} dC$	1,94	11,07	0,035	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{0,49} \int_0^C C^{0,72} e^{-\frac{C}{0,7}} dC$	2,51		0,059	
Печорский бассейн	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{1,68C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C - 0,13)^2}{0,9}} dC$	5,28	12,59	0,072	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{0,65} \int_0^C C^{0,74} e^{-\frac{C}{0,82}} dC$	5,18		0,047	
Кизеловский бассейн	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{1,5C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C - 0,3)^2}{0,72}} dC$	11,8	12,59	0,1	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{0,53} \int_0^C C^{1,29} e^{-\frac{C}{0,71}} dC$	1,08		0,025	
Норильский регион	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{1,23C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C - 0,27)^2}{0,48}} dC$	0,9	11,07	0,035	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{0,13} \int_0^C C^{2,73} e^{-\frac{C}{0,39}} dC$	2,19		0,068	

Продолжение таблицы 3.21

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{1,18C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C - 1,12)^2}{0,44}} dC$	5,72	12,59	0,088	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{3,24} \int_0^C C^{3,03} e^{-\frac{C}{0,85}} dC$	3,63		0,041	
Якутский регион	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C + 0,32)^2}{0,32}} dC$	3,21	5,99	0,05	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{1,02 \cdot 10^{-3}} \int_0^C C^{4,58} e^{-\frac{C}{0,14}} dC$	2,75		0,072	

Полученные вероятностные законы плотности распределения вероятности параметров изоляции, а также емкости подземных электрических сетей угольных шахт приведены в таблице 3.22. Указанные законы получены с учетом выражения 2.21.

На рисунках 3.4-3.5 представлены графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Кузнецкого бассейна.

Графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Печорского и Кизеловского бассейнов, а также Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов приведены в таблицах приложения В.

В таблицах 3.23-3.26 представлены статистические характеристики теоретических законов распределения параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт, вычисленные с использованием выражений 2.22-2.31.

Таблица 3.22 – Законы плотности распределения вероятности параметров изоляции, а также емкости подземных электрических сетей угольных шахт

Горнопромышленный район	Закон распределения параметров изоляции подземных электрических сетей			
	Активное сопротивление	Емкостное сопротивление	Полное сопротивление	Емкость
Кузнецкий бассейн	$f(R) = \frac{1}{1,7 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 1,61)^2}{0,92}}$	$f(X) = X^{0,52} \cdot \frac{e^{-\frac{X}{2,9}}}{4,49}$	$f(Z) = Z^{0,87} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{1,98}}}{3,41}$	$f(C) = \frac{1}{1,7 \cdot C} e^{-\frac{(\ln C + 0,04)^2}{0,92}}$
Печорский бассейн	$f(R) = \frac{1}{1,48 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 1,88)^2}{0,7}}$	$f(X) = \frac{1}{2,06 \cdot X} e^{-\frac{(\ln X - 1,12)^2}{1,34}}$	$f(Z) = \frac{1}{2,06 \cdot Z} e^{-\frac{(\ln Z - 0,99)^2}{1,34}}$	$f(C) = C^{0,74} \cdot \frac{e^{-\frac{C}{0,82}}}{0,65}$
Кизеловский бассейн	$f(R) = \frac{1}{1,75 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 1,6)^2}{0,98}}$	$f(X) = X^{0,12} \cdot \frac{e^{-\frac{X}{2,8}}}{2,98}$	$f(Z) = \frac{1}{1,8 \cdot Z} e^{-\frac{(\ln Z - 0,74)^2}{1,04}}$	$f(C) = C^{1,29} \cdot \frac{e^{-\frac{C}{0,71}}}{0,53}$
Норильский регион	$f(R) = R^{4,12} \cdot \frac{e^{-\frac{R}{1,88}}}{729,5}$	$f(X) = X^{0,52} \cdot \frac{e^{-\frac{X}{2,21}}}{2,97}$	$f(Z) = Z^{0,57} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{2,03}}}{2,7}$	$f(C) = \frac{1}{1,23 \cdot C} e^{-\frac{(\ln C - 0,27)^2}{0,48}}$
Восточно-Сибирский регион	$f(R) = \frac{1}{1,25 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 1,59)^2}{0,5}}$	$f(X) = X^{0,47} \cdot \frac{e^{-\frac{X}{2,48}}}{3,38}$	$f(Z) = Z^{1,13} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{0,94}}}{0,93}$	$f(C) = C^{3,03} \cdot \frac{e^{-\frac{C}{0,85}}}{3,24}$
Якутский регион	$f(R) = R^{1,41} \cdot \frac{e^{-\frac{R}{3,27}}}{21,73}$	$f(X) = \frac{1}{1,33 \cdot X} e^{-\frac{(\ln X - 1,29)^2}{0,56}}$	$f(Z) = \frac{1}{1,15 \cdot Z} e^{-\frac{(\ln Z - 1,16)^2}{0,42}}$	$f(C) = \frac{1}{C} e^{-\frac{(\ln C + 0,32)^2}{0,32}}$

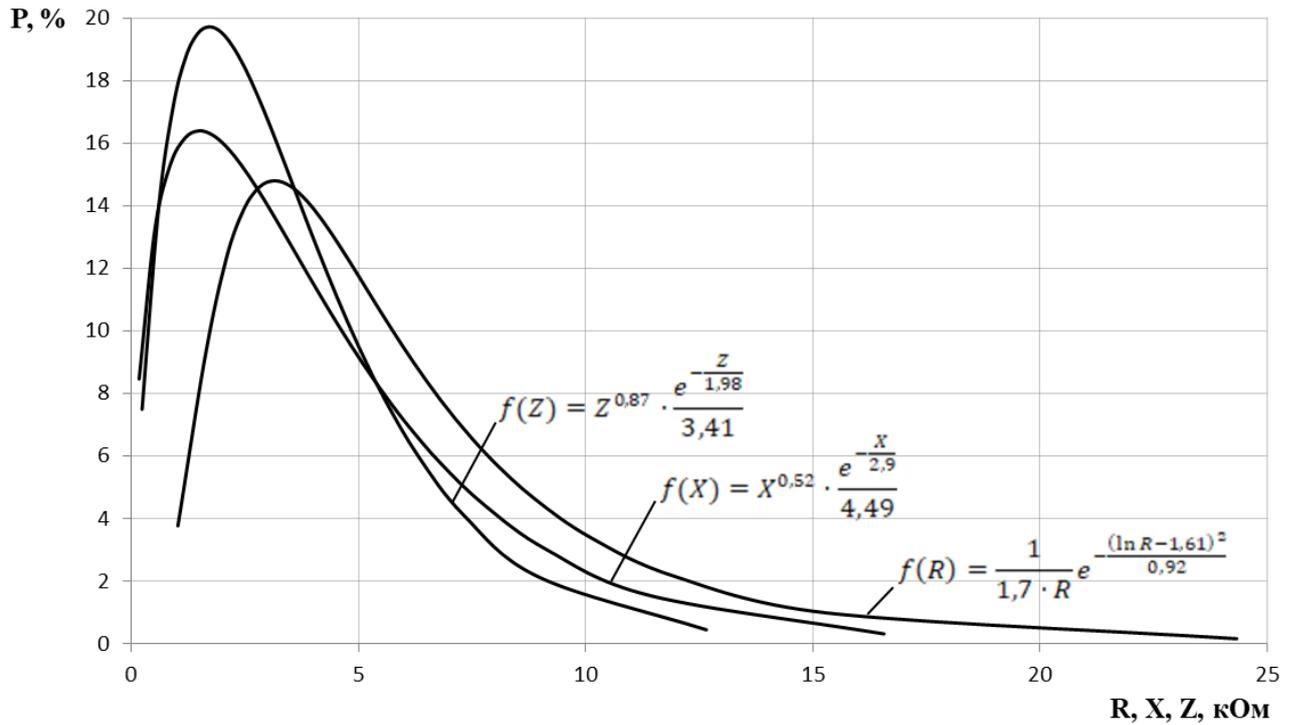


Рисунок 3.4 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кузнецкого бассейна

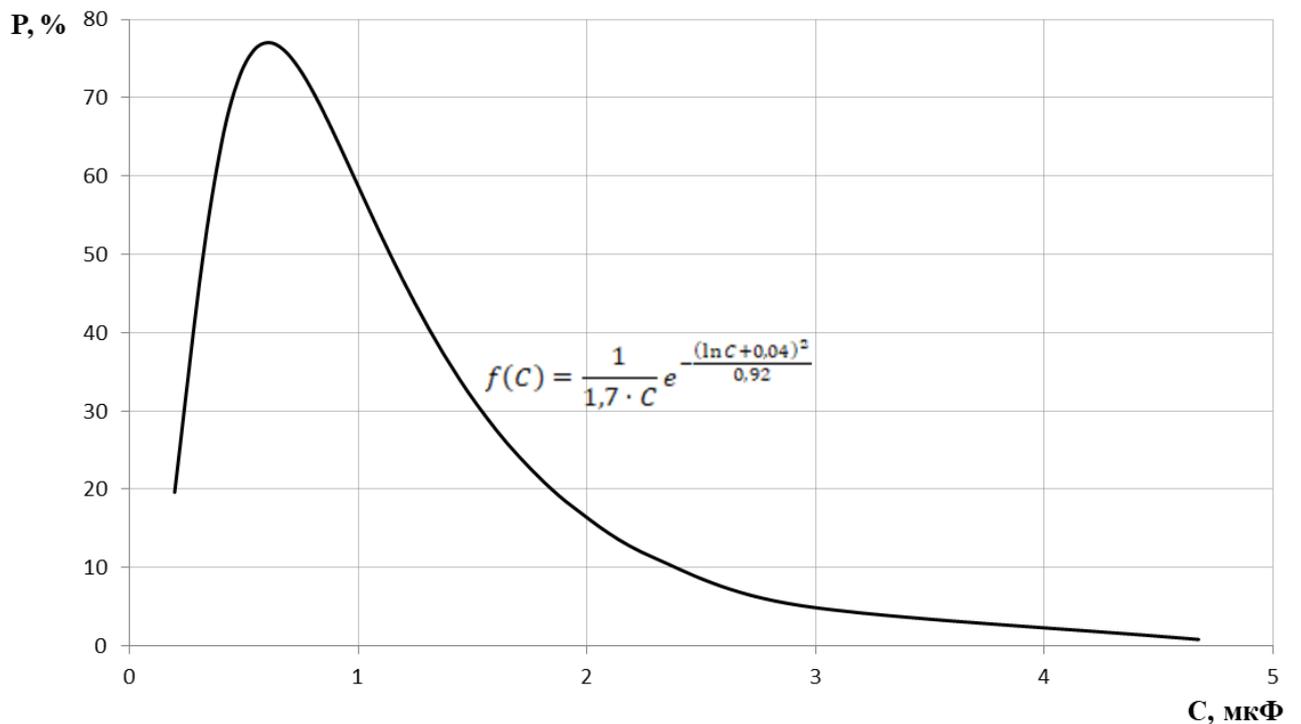


Рисунок 3.5 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Кузнецкого бассейна

Таблица 3.23 – Статистические характеристики теоретических законов распределения активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Математическое ожидание, кОм	6,30	7,81	6,33	9,63	5,56	7,88
Дисперсия, кОм ²	23,16	25,54	25,32	18,10	8,77	25,77
Стандартное отклонение, кОм	4,81	5,05	5,03	4,25	2,96	5,08
Коэффициент асимметрии	2,74	2,21	2,89	0,88	1,75	1,29
Коэффициент эксцесса	15,77	9,81	17,79	1,17	5,90	2,49

Таблица 3.24 – Статистические характеристики теоретических законов распределения емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Математическое ожидание, кОм	4,41	4,28	3,14	3,36	3,65	4,18
Дисперсия, кОм ²	12,78	17,52	8,78	7,42	9,04	5,64
Стандартное отклонение, кОм	3,58	4,19	2,96	2,72	3,01	2,38
Коэффициент асимметрии	1,62	3,86	1,89	1,62	1,65	1,89
Коэффициент эксцесса	3,95	34,97	5,36	3,95	4,08	6,95

Таблица 3.25 – Статистические характеристики теоретических законов распределения полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Математическое ожидание, кОм	3,70	3,76	2,72	3,19	2,00	3,54
Дисперсия, кОм ²	7,33	13,51	5,04	6,47	1,88	2,93
Стандартное отклонение, кОм	2,71	3,68	2,24	2,54	1,37	1,71
Коэффициент асимметрии	1,46	3,86	3,04	1,60	1,37	1,56
Коэффициент эксцесса	3,21	34,97	20,01	3,82	2,82	4,64

Таблица 3.26 – Статистические характеристики теоретических законов распределения емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район					
	Кузнецкий бассейн	Печорский бассейн	Кизеловский бассейн	Норильский регион	Восточно-Сибирский регион	Якутский регион
Математическое ожидание, мкФ	1,21	1,43	1,63	1,48	3,43	0,79
Дисперсия, мкФ ²	0,85	1,17	1,15	0,59	2,91	0,11
Стандартное отклонение, мкФ	0,92	1,08	1,07	0,77	1,71	0,33
Коэффициент асимметрии	2,74	1,52	1,32	1,70	1,00	1,32
Коэффициент эксцесса	15,77	3,45	2,62	5,57	1,49	3,26

Из полученных результатов исследования (таблица 3.22) следует:

- Распределения активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Кизеловского, Печорского бассейнов и Восточно-Сибирского региона соответствуют логнормальным законам. Распределения активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Норильского и Якутского регионов соответствуют гамма-законам.

- Распределения емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Кизеловского бассейнов, Норильского и Восточно-Сибирского регионов соответствуют гамма-распределениям, в то время как для угольных шахт предприятий Печорского бассейна и Якутского региона распределения емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей соответствуют логнормальным распределениям.

- Распределения полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого бассейна, Норильского и Восточно-Сибирского регионов соответствуют гамма-распределениям. Для подземных электрических сетей шахт предприятий Печорского и Кизеловского бассейнов, Якутского региона распределения полного сопротивления изоляции соответствуют логнормальным распределениям.

- Распределения емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт предприятий Кузнецкого бассейна, Норильского и Якутского регионов соответствуют логнормальным распределениям. Для подземных электрических сетей шахт предприятий Печорского и Кизеловского бассейнов, Восточно-Сибирского региона распределения емкости соответствуют гамма распределениям.

Данные таблиц 3.23-3.25 отражают статистические характеристики теоретических законов распределения активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт. Анализ таблиц показывает, что наибольшие средние значения среди других присущи активному сопротивлению изоляции, которые колеблются в пределах $5,56 \div 9,63$ кОм. Средние значения емкостного сопротивления изоляции составляют от одной до двух третей от значений активного сопротивления (от 3,14 до 4,41 кОм).

Наибольшее среднее значение (3,76 кОм) полного сопротивления изоляции присуще электрическим сетям угольных шахт Печорского бассейна, наименьшее (2,0 кОм) – электрическим сетям угольных шахт Восточно-Сибирского региона.

Данные таблицы 3.26 соответствуют статистическим характеристикам теоретических законов распределения емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт. Анализ представленных в таблице данных показывает, что наибольшее среднее значение емкости (3,43 мкФ) соответствует подземным электрическим сетям Восточно-Сибирского региона. Для этих же сетей наблюдается и наибольшая вариабельность, выраженная наибольшими среди других сетей значениями дисперсии и стандартного отклонения ($2,91$ мкФ² и $1,71$ мкФ соответственно).

Наименьшее среднее значение емкости относительно земли (0,79 мкФ) наблюдается в подземных электрических сетях Якутского региона.

3.3.3. Вероятностные законы распределения параметров изоляции рудничных электрических сетей

Расчетные параметры законов распределения активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости рудничных электрических сетей относительно земли, вычисленные с использованием метода моментов (2.12, 2.14), представлены в таблице 3.27.

Таблица 3.27 – Параметры экспериментальных законов распределения активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции рудничных подземных электрических сетей

Вид экспериментального закона распределения	Параметр	Горнопромышленный район		
		Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Активное сопротивление изоляции				
Логнормальное распределение	μ	2,04	1,1	1,48
	σ^2	0,25	0,25	0,45
Гамма-распределение	α	3,52	3,45	1,75
	β	2,48	0,99	3,13
Емкостное сопротивление изоляции				
Логнормальное распределение	μ	1,0	0,4	1,66
	σ^2	0,46	0,27	0,38
Гамма-распределение	α	1,68	3,19	2,15
	β	2,04	0,54	2,96
Полное сопротивление изоляции				
Логнормальное распределение	μ	0,94	0,16	1,31
	σ^2	0,37	0,49	0,53
Гамма-распределение	α	2,2	1,58	1,44
	β	1,4	0,95	3,36
Емкость				
Логнормальное распределение	μ	0,15	0,7	-0,61
	σ^2	0,31	0,14	0,8
Гамма-распределение	α	2,77	6,66	0,82
	β	0,49	0,32	0,98

Приведенные в таблице 3.27 данные характеризуют параметры экспериментальных законов распределения активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости сетей, и являются основой для проверки статистических гипотез о виде теоретических законов распределения.

Теоретические законы функции распределения параметров изоляции, а также емкости подземных электрических сетей рудников, определены с применением данных таблицы 3.27.

Проверка гипотез о законах распределения выполнена с помощью критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова (2.20). Указанные законы приведены в таблицах 3.28-3.31.

Таблица 3.28 – Функции распределения активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{набл}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{набл}$	$K_{0,05}$
Норильский регион	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,25R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 2,04)^2}{0,5}} dR$	2,95	5,99	0,027	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{83,11} \int_0^R R^{2,52} e^{-\frac{R}{2,48}} dR$	5,12		0,081	
Комбинат "Апатит"	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,25R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 1,1)^2}{0,5}} dR$	4,21	7,82	0,081	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{3,04} \int_0^R R^{2,45} e^{-\frac{R}{0,99}} dR$	6,47		0,056	
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(R) = \frac{1}{1,68R} \int_{-\infty}^R e^{-\frac{(\ln R - 1,48)^2}{0,9}} dR$	2,02	7,82	0,059	0,134
	Гамма	$F(R) = \frac{1}{6,77} \int_0^R R^{0,75} e^{-\frac{R}{3,13}} dR$	7,88		0,115	

Таблица 3.29 – Функции распределения емкостного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Норильский регион	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{1,7X} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(\ln X - 1,0)^2}{0,92}} dX$	1,71	7,82	0,044	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{3} \int_0^X X^{0,68} e^{-\frac{X}{2,04}} dX$	6,99		0,076	
Комбинат "Апатит"	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{1,3X} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(\ln X - 0,4)^2}{0,54}} dX$	6,19	9,49	0,064	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{0,34} \int_0^X X^{2,19} e^{-\frac{X}{0,54}} dX$	7,59		0,044	
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(X) = \frac{1}{1,55X} \int_{-\infty}^X e^{-\frac{(\ln X - 1,66)^2}{0,76}} dX$	10,4	5,99	0,132	0,134
	Гамма	$F(X) = \frac{1}{11,06} \int_0^X X^{1,15} e^{-\frac{X}{2,96}} dX$	5,22		0,108	

Таблица 3.30 – Функции распределения полного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Норильский регион	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,52Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 0,94)^2}{0,74}} dZ$	2,59	5,99	0,058	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{2,31} \int_0^Z Z^{1,2} e^{-\frac{Z}{1,4}} dZ$	1,44		0,055	
Комбинат "Апатит"	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,75Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 0,16)^2}{0,98}} dZ$	8,49	9,49	0,107	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{0,82} \int_0^Z Z^{0,58} e^{-\frac{Z}{0,95}} dZ$	2,34		0,041	
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(Z) = \frac{1}{1,82Z} \int_{-\infty}^Z e^{-\frac{(\ln Z - 1,31)^2}{1,06}} dZ$	7,32	5,99	0,101	0,134
	Гамма	$F(Z) = \frac{1}{5,07} \int_0^Z Z^{0,44} e^{-\frac{Z}{3,36}} dZ$	3,07		0,044	

Таблица 3.31 – Функции распределения емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли

Горнопромышленный район	Вид закона распределения	Функция распределения	Критерий согласия			
			Пирсона		Колмогорова-Смирнова	
			$\chi^2_{\text{набл}}$	$\chi^2_{0,05}$	$K_{\text{набл}}$	$K_{0,05}$
Норильский регион	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{1,4C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C - 0,15)^2}{0,62}} dC$	9,13	7,82	0,06	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{0,23} \int_0^C C^{1,77} e^{-\frac{C}{0,49}} dC$	4,81		0,044	
Комбинат "Апатит"	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{0,94C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C - 0,7)^2}{0,28}} dC$	8,64	15,51	0,057	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{0,19} \int_0^C C^{5,66} e^{-\frac{C}{0,32}} dC$	17,7		0,123	
Восточно-Сибирский регион	Логнормальный	$F(C) = \frac{1}{2,24C} \int_{-\infty}^C e^{-\frac{(\ln C + 0,61)^2}{1,6}} dC$	3,52	7,82	0,048	0,134
	Гамма	$F(C) = \frac{1}{1,12} \int_0^C C^{-0,18} e^{-\frac{C}{0,98}} dC$	6,65		0,084	

Полученные вероятностные законы плотности распределения вероятности параметров изоляции, а также емкости подземных электрических сетей рудников приведены в таблице 3.32. Указанные законы получены с учетом выражения 2.21.

На рисунках 3.6-3.7 представлены графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников Норильского региона.

Графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции, а также емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников Восточно-Сибирского региона и комбината «Апатит» приведены в таблицах приложения Г.

Таблица 3.32 – Законы плотности распределения вероятности параметров изоляции, а также емкости рудничных подземных электрических сетей

Горнопромышленный район	Закон распределения параметров изоляции подземных электрических сетей			
	Активное сопротивление	Емкостное сопротивление	Полное сопротивление	Емкость
Норильский регион	$f(R) = \frac{1}{1,25 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 2,04)^2}{0,5}}$	$f(R) = \frac{1}{1,7 \cdot X} e^{-\frac{(\ln X - 1)^2}{0,92}}$	$f(Z) = Z^{1,2} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{1,4}}}{2,31}$	$f(C) = C^{1,77} \cdot \frac{e^{-\frac{C}{0,49}}}{0,23}$
Комбинат "Апатит"	$f(R) = \frac{1}{1,25 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 1,1)^2}{0,5}}$	$f(X) = X^{2,19} \cdot \frac{e^{-\frac{X}{0,54}}}{0,34}$	$f(Z) = Z^{0,58} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{0,95}}}{0,82}$	$f(C) = \frac{1}{0,94 \cdot C} e^{-\frac{(\ln C - 0,7)^2}{0,28}}$
Восточно-Сибирский регион	$f(R) = \frac{1}{1,68 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 1,48)^2}{0,9}}$	$f(X) = X^{1,15} \cdot \frac{e^{-\frac{X}{2,96}}}{11,03}$	$f(Z) = Z^{0,44} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{3,36}}}{5,1}$	$f(C) = \frac{1}{2,24 \cdot C} e^{-\frac{(\ln C + 0,61)^2}{1,6}}$

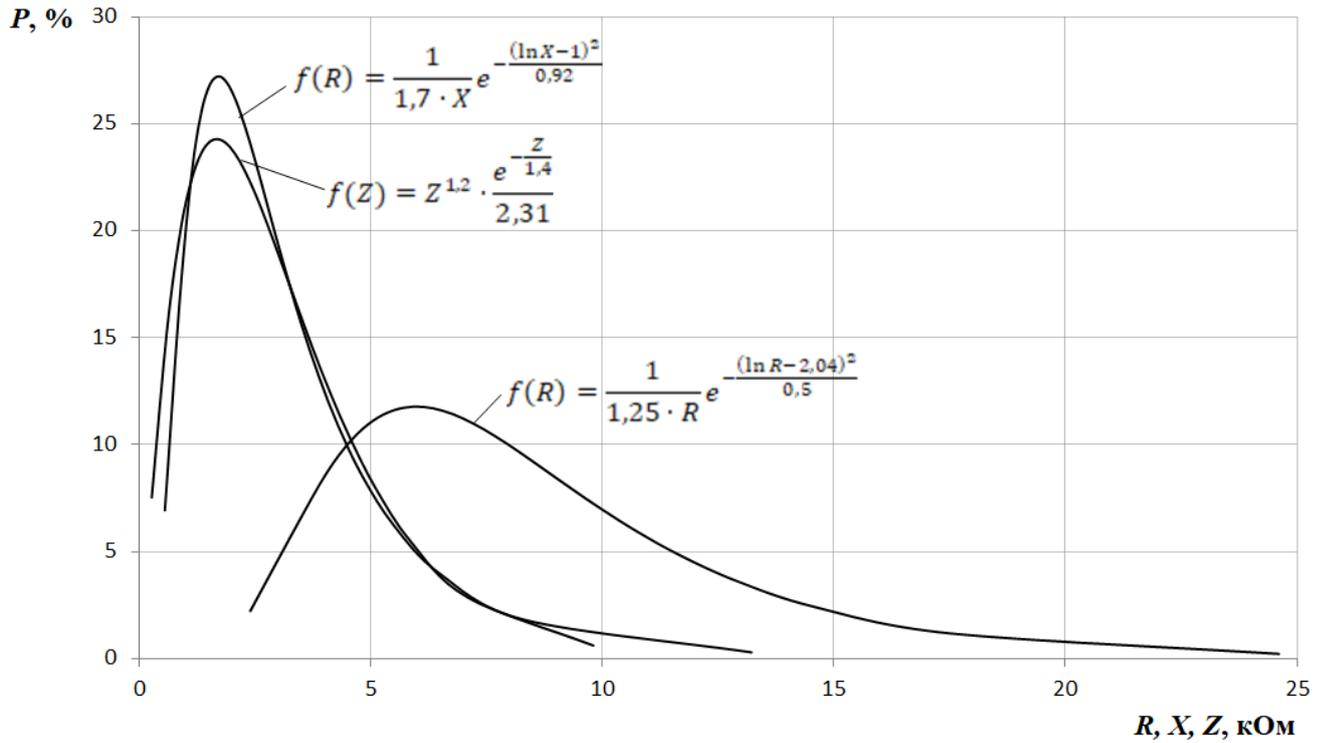


Рисунок 3.6 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции рудничных подземных электрических сетей Норильского региона

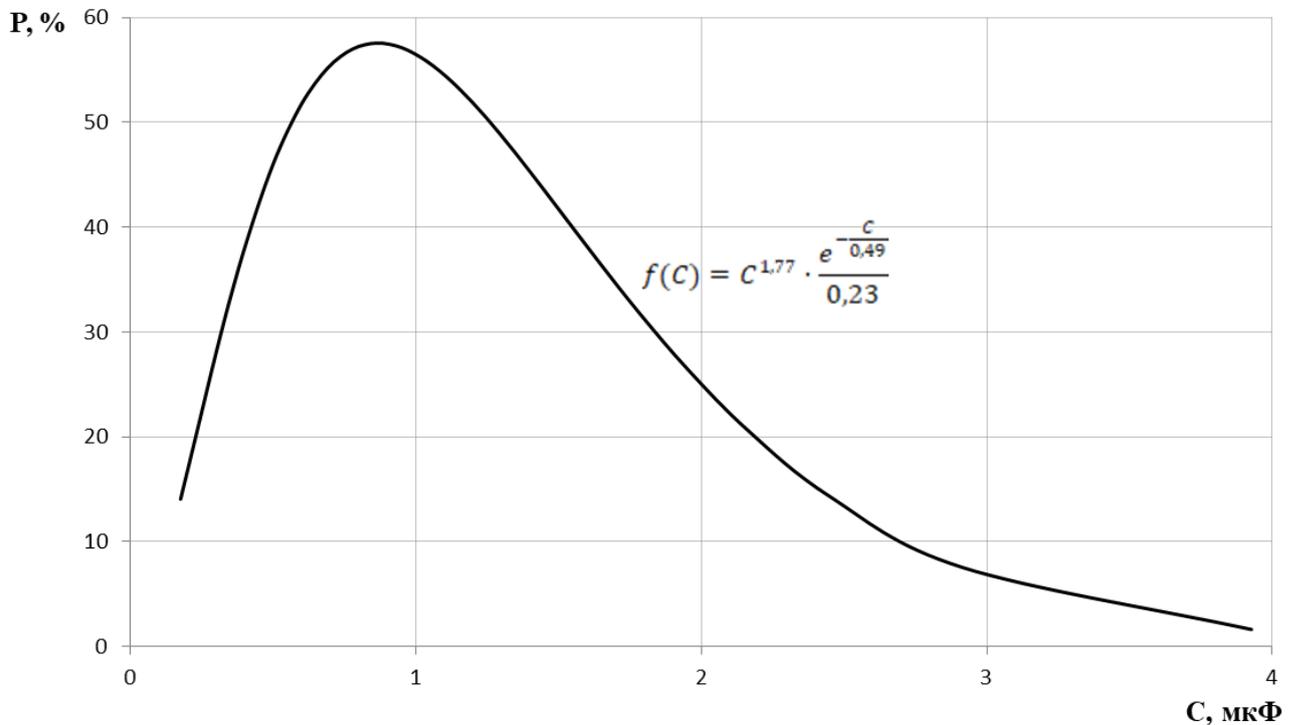


Рисунок 3.7 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли Норильского региона

В таблицах 3.33-3.36 представлены статистические характеристики теоретических законов распределения параметров изоляции рудничных подземных электрических сетей, вычисленные с использованием выражений 2.22-2.31.

Таблица 3.33 – Статистические характеристики теоретических законов распределения активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Математическое ожидание, кОм	8,71	3,40	5,50
Дисперсия, кОм ²	21,57	3,29	17,20
Стандартное отклонение, кОм	4,64	1,81	4,15
Коэффициент асимметрии	1,75	1,75	2,69
Коэффициент эксцесса	5,90	5,90	15,14

Таблица 3.34 – Статистические характеристики теоретических законов распределения емкостного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Математическое ожидание, кОм	3,42	1,72	6,36
Дисперсия, кОм ²	6,84	0,93	18,84
Стандартное отклонение, кОм	2,61	0,96	4,34
Коэффициент асимметрии	2,74	1,12	1,36
Коэффициент эксцесса	15,77	1,88	2,79

Таблица 3.35 – Статистические характеристики теоретических законов распределения полного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Математическое ожидание, кОм	3,08	1,50	4,84
Дисперсия, кОм ²	4,31	1,43	16,26
Стандартное отклонение, кОм	2,08	1,19	4,03
Коэффициент асимметрии	1,35	1,59	1,67
Коэффициент эксцесса	2,73	3,80	4,17

Таблица 3.36 – Статистические характеристики теоретических законов распределения емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли

Статистическая характеристика	Горнопромышленный район		
	Норильский регион	Комбинат "Апатит"	Восточно-Сибирский регион
Математическое ожидание, мкФ	1,36	2,16	0,81
Дисперсия, мкФ ²	0,67	0,70	0,81
Стандартное отклонение, мкФ	0,82	0,84	0,90
Коэффициент асимметрии	1,20	1,22	4,68
Коэффициент эксцесса	2,17	2,76	55,44

Из полученных результатов исследования (таблица 3.32) следует:

- Распределения активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей предприятий Норильского и Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит» соответствуют логнормальным законам.

- Распределения емкостного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей предприятий Восточно-Сибирского региона и комбината «Апатит» соответствуют гамма-распределениям, в то время как для рудников Норильского региона распределение емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей соответствует логнормальному распределению.

- Распределения полного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей предприятий Норильского и Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит» соответствуют гамма распределениям.

- Распределения емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли предприятий Восточно-Сибирского региона и комбината «Апатит» соответствуют логнормальным распределениям, в то время как для рудников Норильского региона распределение емкости подземных электрических сетей относительно земли соответствует гамма-распределению.

Анализируя теоретические статистические характеристики активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции, представленные в таблицах 3.33-

3.35, можно отметить их некоторый разброс. Наименьшее значение (3,4 кОм) математического ожидания активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей наблюдается для рудников комбината «Апатит». Для подземных электрических сетей рудников Норильского региона значение указанной характеристики более чем в 2,5 раза больше и составляет 8,71 кОм. При этом дисперсия активного сопротивления подземных электрических сетей рудников комбината «Апатит» соизмерима со значением математического ожидания, тогда как для рудничных электрических сетей Норильского региона дисперсия практически в 2,5 раза выше величины математического ожидания.

Это показывает, что значения активного сопротивления рудничных электрических сетей комбината «Апатит» сосредоточены около величины математического ожидания, а для подземных электрических сетей рудников Норильского региона указанные значения лежат в широком, относительно среднего значения, пределе. Схожая с Норильским регионом картина наблюдается для активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции рудничных электрических сетей Восточно-Сибирского региона, что в первую очередь обусловлено горно-геологическими и климатическими особенностями региона.

Данные таблицы 3.36 соответствуют статистическим характеристикам теоретических законов распределения емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли. Анализ представленных в таблице данных показывает, что наибольшее среднее значение емкости (2,16 мкФ) соответствует подземным электрическим сетям комбината «Апатит». Наибольшая вариабельность, выраженная наибольшими среди других сетей значениями дисперсии и стандартного отклонения (0,81 мкФ² и 0,9 мкФ соответственно) соответствует подземным электрическим сетям предприятий Восточно-Сибирского региона.

Наименьшее среднее значение емкости относительно земли (0,81 мкФ) наблюдается в подземных электрических сетях предприятий Восточно-Сибирского региона.

3.4. Выводы

В настоящей главе обобщены и представлены статистические характеристики и определены вероятностные законы распределения параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников горных предприятий.

Рассмотрение вышеуказанных вопросов позволяет сделать выводы:

1. Обобщен и представлен статистический материал по характеристикам активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт шести горнопромышленных районов: Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов.

2. Обобщен и представлен статистический материал по характеристикам активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли трех горнопромышленных районов: Норильского и Восточно-Сибирского регионов и комбината «Апатит».

3. Установлено, что распределения параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов, а также комбината «Апатит» соответствуют логнормальному и гамма-закону.

4. Впервые получены вероятностные законы распределения параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов (таблица 3.22).

5. Впервые получены вероятностные законы распределения параметров изоляции рудничных подземных электрических сетей Норильского и Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит» (таблица 3.32).

Полученные в настоящей главе вероятностные законы распределения и теоретические статистические характеристики параметров изоляции подземных

электрических сетей горных предприятий целесообразно использовать для исследования условий электробезопасности в электрических сетях с изолированным режимом нейтрали, в том числе в подземных электрических сетях горных предприятий.

Глава 4. Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий

4.1. Исходные положения

В соответствии с разработанными в главе 2 методическими положениями требуется определить параметры сетей и допущения при исследовании электробезопасности в подземных электрических сетях. При проведении указанного исследования принимаются следующие параметры сетей и допущения:

1. Линейное напряжение питающей сети равно 380 В.
2. Активные сопротивления изоляции фаз сети относительно земли равны между собой: $R_A = R_B = R_C = R$.
3. Емкости фаз сети относительно земли равны между собой: $C_A = C_B = C_C = C$.
4. Общее переходное активное сопротивление заземляющего устройства (R_3) в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников не превышает 2 Ома [85, 86].
5. Время воздействия электрического тока на человека при возникновении электропоражения равно 0,2 с [85, 86].
6. Допустимое значение тока, проходящего через человека ($I_{ч\ доп}$), равно 190 мА [21].
7. Значение длительно допустимого безопасного тока ($I_{ч\ дл. доп}$) принимается равным 6 мА [21].

В связи с тем, что сопротивление изоляции является важнейшим защитным средством в сетях с изолированной нейтралью угольных шахт и рудников, то представляется актуальным определить те уровни обеспечения условий электробезопасности, которые обеспечиваются состоянием сопротивления изоляции подземных электрических сетей. Здесь под уровнем электробезопасности понимается то значение вероятности (уровень), при котором

полное сопротивление изоляции сети, определенное по выражению 2.41 при необходимых условиях возникновения электротравмы ($r_{п} = 0, r_{об} = 0$), обеспечивает ток, не превышающий $I_{ч доп}$ при времени воздействия 0,2 с.

4.2. Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт

Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт выполнено в условиях предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов.

В соответствии с проведенным в главе 1 анализом электротравматизма, в подземных электрических сетях угольных шахт 73,4% электротравм происходит при однофазном прикосновении к токоведущим частям электроустановки, находящимся под напряжением (прямое прикосновение), 26,6% – при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции (косвенное прикосновение). В этой связи представляется целесообразным исследовать условия электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт как при прямом, так и при косвенном прикосновении.

Для оценки вероятностных уровней обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях в каждом из исследуемых регионов используем полученные в главе 3 законы распределения вероятностей (таблица 3.20). Оценку проведем для угольных шахт Восточно-Сибирского региона, оценки для других регионов проводятся аналогичным образом.

Определим уровень обеспечения условий электробезопасности на примере подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона.

Распределение вероятности полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона соответствует гамма-закону распределения (таблица 3.17). Функция распределения

(интегральный закон распределения) полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона имеет вид

$$F(Z) = \frac{1}{0,93} \int_0^Z Z^{1,13} e^{-\frac{Z}{0,94}} dZ. \quad (4.1)$$

С применением выражения 4.1 определяется вероятность обеспечения требуемых условий электробезопасности в подземных сетях угольных шахт предприятий Восточно-Сибирского региона при сопротивлении Z_{min} , обеспечивающим безопасный ток при времени воздействия 0,2 с. Допустимое сопротивление Z_{min} , определенное по выражению 2.41 при наихудших условиях возникновения электротравмы ($r_{п} = 0, r_{об} = 0$) и протекания тока через тело человека, не превышающего $I_{ч доп}$, равно 0,92 кОм. Это сопротивление обусловлено уровнем питающего напряжения (U), безопасным током через человека ($I_{ч доп}$) и сопротивлением тела человека ($R_{ч}$).

Выражение 4.1 позволяет определить вероятностный уровень электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт предприятий Восточно-Сибирского региона, при котором условия электробезопасности не обеспечиваются (2.42), а именно:

$$F_{HO}(Z) < F(Z_{min}) = 0,224 \text{ или } 22,4 \%. \quad (4.2)$$

С использованием выражения 2.43 вычисляется вероятностный уровень обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт предприятий Восточно-Сибирского региона:

$$F_0(Z) \geq F(Z_{min}) = 0,776 \text{ или } 77,6 \%. \quad (4.3)$$

На рисунке 4.1 представлена графическая интерпретация определения уровня обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях предприятий Восточно-Сибирского региона.

На рисунке 4.1 можно выделить две характерные области, отражающие обеспечение условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт Восточно-Сибирского региона:

- Область 1, в которой условия электробезопасности не обеспечиваются – $F_{HO}(Z) < F(Z_{min})$;

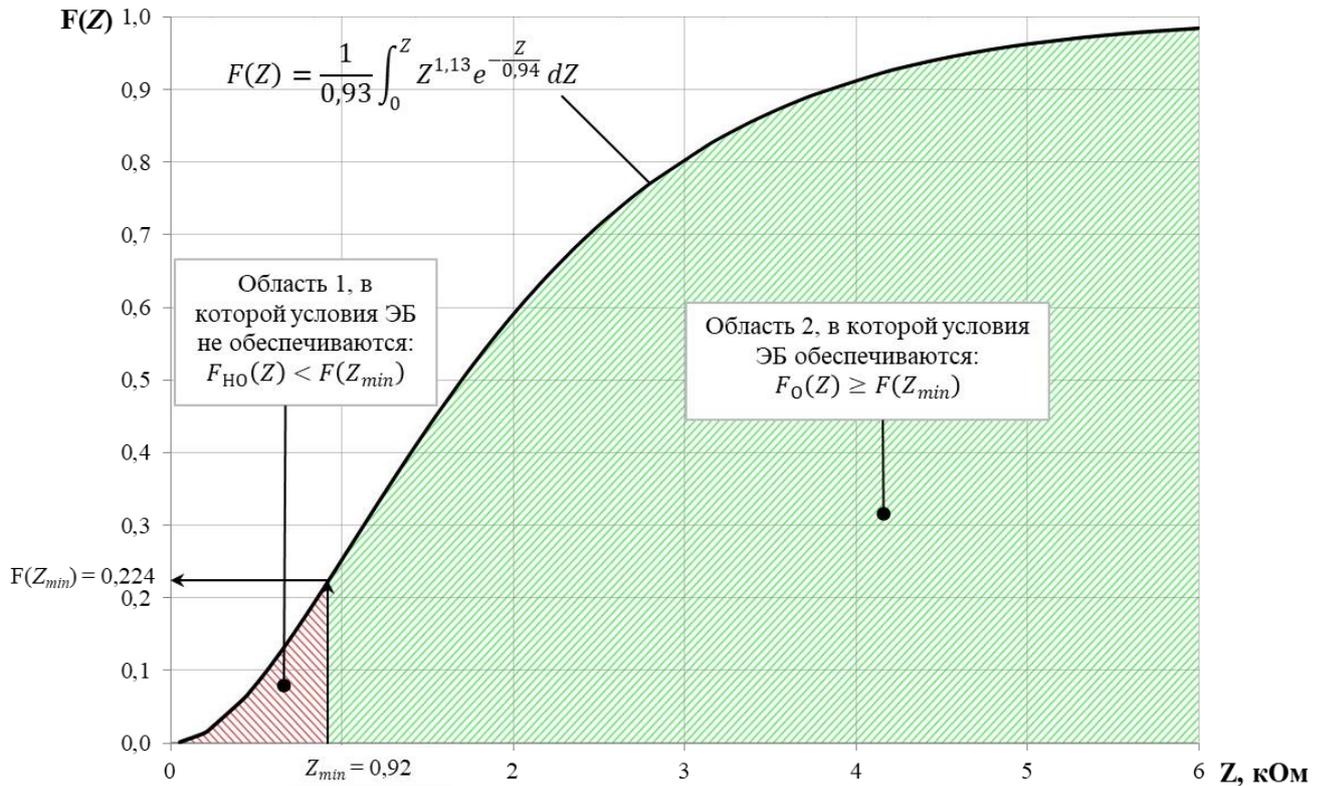


Рисунок 4.1 – Области условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт Восточно-Сибирского региона, обусловленные полным сопротивлением изоляции

- Область 2, в которой условия электробезопасности обеспечиваются – $F_O(Z) \geq F(Z_{min})$.

Техническая интерпретация вероятностного уровня обеспечения электробезопасности показывает, какой процент электрических сетей обеспечивает условия электробезопасности в подземных выработках угольных шахт соответствующего региона.

Вероятностные уровни обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт Кузнецкого, Печорского и Кизеловского бассейнов, Норильского и Якутского регионов приведены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Уровни обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт

Горнопромышленный район	Уровни обеспечения условий электробезопасности	
	$F_0(Z), \%$	$F_{НО}(Z), \%$
Кузнецкий бассейн	90,0	10,0
Печорский бассейн	90,4	9,6
Кизеловский бассейн	87,2	12,8
Норильский регион	84,2	15,8
Восточно-Сибирский регион	77,6	22,4
Якутский регион	99,6	0,4

Анализ данных о вероятностных уровнях обеспечения электробезопасности (таблица 4.1) позволяет сделать выводы:

1. Условия электробезопасности с 95-% вероятностью обеспечиваются только для подземных электрических сетей шахт Якутского региона, где доля таких сетей составляет 99,6%.

2. Вероятностные уровни обеспечения электробезопасности для угольных шахт других исследуемых регионов находятся в диапазоне 77,6-90,4%.

3. Для повышения условий электробезопасности в подземных выработках угольных шахт необходимо обеспечить повышение значения полного сопротивления изоляции электрических сетей до минимального значения, равного 0,92 кОм.

В рамках трехэлементной системы электробезопасности целесообразно оценить зависимость поражающего фактора (тока через человека при его прикосновении к фазному проводнику) от активного и емкостного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей. При этом целесообразно выразить емкостное сопротивление изоляции через активное сопротивление изоляции, упрощая при этом выражение 2.39.

Зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции электрических сетей определим в виде корреляционных зависимостей на основе функций распределения вероятностей активного и емкостного сопротивлений для горных предприятий исследуемых регионов (таблицы 3.18, 3.19).

Для этого составим два сопряженных вариационных ряда значений активного и емкостного сопротивлений, вычисленных по функциям распределения вероятностей $F(R)$ и $F(X)$ с шагом расчета 0,01. Таким образом получим 100 пар сопряженных равновероятностных значений активного и емкостного сопротивлений изоляции для предприятий определенного региона.

На рисунке 4.2 представлено корреляционное поле для нахождения искомой зависимости емкостного сопротивления изоляции от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона.

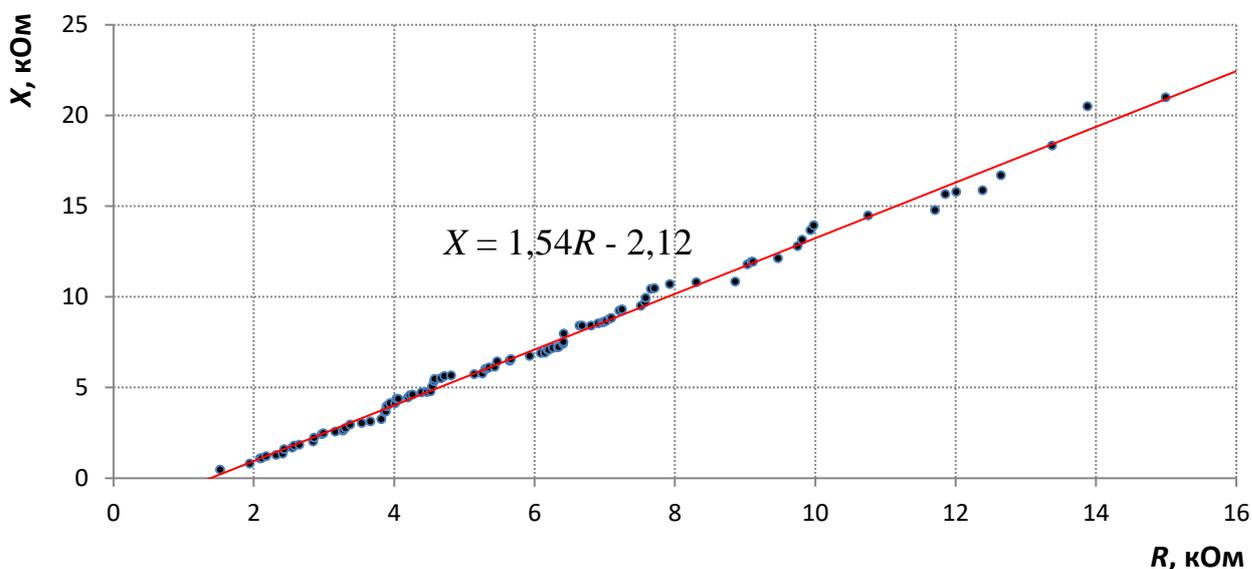


Рисунок 4.2 – Корреляционное поле и зависимость емкостного от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона

Определенное с использованием МНК уравнение зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона имеет вид:

$$X = 1,54R - 2,12, \text{ кОм.} \quad (4.4)$$

Теснота связи между емкостным и активным сопротивлениями изоляции для выражения 4.4 оценена с помощью коэффициентов парной линейной корреляции и детерминации. Значение коэффициента парной линейной корреляции, вычисленное по выражению 2.48, равно:

$$r_{RX} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} = \frac{1323,71}{\sqrt{862,03 \cdot 2044,72}} = 0,997. \quad (4.5)$$

Значение коэффициента детерминации, определенное с использованием выражения 2.49, равно:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{2032,66}{2044,72} = 0,994. \quad (4.6)$$

Значение коэффициентов, близкие к единице, соответствуют тесной связи между активным и емкостным сопротивлениями изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона. По шкале Чеддока связь характеризуется как весьма высокая.

Математическая точность полученной зависимости 4.4 оценивается средней относительной ошибкой аппроксимации, определяемой с использованием выражения 2.51. Указанная ошибка для выражения 4.4 равна:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i} \right| \cdot 100\% = \frac{1}{100} |-0,4| \cdot 100\% = 0,4\%. \quad (4.7)$$

Значение относительной ошибки аппроксимации, равное 0,4%, по шкале Чеддока соответствует высокой математической точности уравнения зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона.

Зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции $X = f(R)$, а также оценки тесноты связи между параметрами зависимости и их математической точности, приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2 – Зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Горнопромышленный район	Зависимость $X = f(R)$	r_{RX}	Качественная оценка тесноты связи	R^2	A, %	Качественная оценка математической точности
Кузнецкий бассейн	$X = 0,8R - 0,5$	0,985	весьма высокая	0,97	5,54	высокая
Печорский бассейн	$X = 0,74R - 1,56$	0,976	весьма высокая	0,952	7,18	высокая
Кизеловский бассейн	$X = 0,63R - 0,82$	0,983	весьма высокая	0,966	0,8	высокая
Норильский регион	$X = 0,6R - 2,73$	0,951	весьма высокая	0,904	26,9	удовлетворительная
Восточно-Сибирский регион	$X = 1,54R - 2,12$	0,997	весьма высокая	0,994	0,4	высокая
Якутский регион	$X = 0,39R + 1,09$	0,995	весьма высокая	0,989	0,31	высокая

Статистическая значимость коэффициента парной линейной корреляции, определенного для выражения 4.4, оценена с использованием t-критерия Стьюдента. Расчетное значение критерия ($t_{расч}$), вычисленное с использованием выражения 2.50, равно:

$$t_{расч} = \frac{r_{RX}}{\sqrt{1 - r_{RX}^2}} \sqrt{n - 2} = \frac{0,997}{\sqrt{1 - 0,997^2}} \sqrt{100 - 2} = 128,53. \quad (4.8)$$

Расчетное значение t-критерия (4.8), больше табличного значения ($t_{табл}$), определенного по таблице критических значений распределения Стьюдента и равного 1,98. В этой связи коэффициент парной линейной корреляции для выражения 4.4 является статистически значимым.

Для проверки статистической значимости зависимости в целом использован F-критерий Фишера. Расчетное значение критерия ($F_{расч}$), вычисленное по 2.52, для выражения 4.4 равно:

$$F_{\text{расч}} = \frac{R^2}{1 - R^2} (n - 2) = \frac{0,994}{1 - 0,994} (100 - 2) = 16519,3. \quad (4.9)$$

Расчетное значение критерия (4.9) многократно превышает табличное значение ($F_{\text{табл}}$), определенное по таблице критических значений распределения Фишера-Снедекора и равное 3,94. В связи с этим, зависимость емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона признается статистически значимой в целом.

Оценка статистической значимости параметров парной линейной зависимости (b_0 и b_1) произведена с использованием t-критерия Стьюдента. Для выражения 4.4 расчетные значения критериев для свободного члена (b_0) и коэффициента линейной зависимости (b_1), вычисленные с использованием выражения 2.53, равны:

$$t_{b_0} = \left| \frac{b_0}{m_{b_0}} \right| = \left| \frac{-2,12}{0,07} \right| = 32,42;$$

$$t_{b_1} = \left| \frac{b_1}{m_{b_1}} \right| = \left| \frac{1,54}{0,01} \right| = 197,95. \quad (4.10)$$

Расчетные значения t-критерия (4.10) больше табличного значения t-критерия ($t_{b \text{ табл}}$), определенного по таблице критических значений распределения Стьюдента и равного 1,98. В этой связи параметры парной линейной зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона (4.4) являются статистически значимыми.

Оценка статистической значимости коэффициентов парной корреляции между емкостным сопротивлением и активным сопротивлением изоляции подземных электрических сетей угольных шахт (r_{RX}), зависимостей $X = f(R)$, а также параметров парных линейных зависимостей (b_0 и b_1) рассматриваемых регионов приведена в таблице 4.3.

Таблица 4.3 – Оценка статистической значимости зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

Горнопромышленный район	Коэффициент парной линейной корреляции		Зависимость $X = f(R)$		Параметры парной линейной зависимости		
	$t_{расч}$	$t_{табл}$	$F_{расч}$	$F_{табл}$	t_{b_0}	t_{b_1}	$t_{b табл}$
Кузнецкий бассейн	56,42	1,98	3183,27	3,94	5,37	45,77	1,98
Печорский бассейн	44,28	1,98	1960,64	3,94	13,44	33,68	1,98
Кизеловский бассейн	53,16	1,98	2826,23	3,94	11,54	34,02	1,98
Норильский регион	30,46	1,98	927,98	3,94	20,68	19,30	1,98
Восточно-Сибирский регион	128,53	1,98	16519,3	3,94	32,42	197,95	1,98
Якутский регион	95,3	1,98	9081,45	3,94	22,57	37,76	1,98

Из анализа данных, представленных в таблицах 4.2 и 4.3, следует:

1. Коэффициенты парной линейной корреляции зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт принимают значения в диапазоне $0,951 \div 0,997$, что свидетельствует о тесной связи между активным и емкостным сопротивлениями изоляции подземных электрических сетей.

2. Средняя относительная ошибка аппроксимации для зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кузнецкого, Печорского и Кизеловского бассейнов, Восточно-Сибирского и Якутского регионов не превышает значения 10%, что свидетельствует о высокой математической точности полученных уравнений. Средняя относительная ошибка аппроксимации для зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных

электрических сетей угольных шахт Норильского региона равна 26,9%, что соответствует удовлетворительной математической точности полученной зависимости. Вместе с этим, принимая во внимание высокую тесноту связи между емкостным и активным сопротивлениями изоляции, подтвержденную коэффициентом парной линейной регрессии и коэффициентом детерминации, зависимость емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Норильского региона является статистически и математически значимой.

3. Статистическая значимость коэффициентов парной корреляции между емкостным сопротивлением и активным сопротивлением изоляции подземных электрических сетей угольных шахт (r_{RX}), зависимостей $X = f(R)$, а также параметров парных линейных зависимостей (b_0 и b_1) рассматриваемых регионов подтверждается положительными результатами проверок ($t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$, $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, $t_{b_0} > t_{b_{\text{табл}}}$, $t_{b_1} > t_{b_{\text{табл}}}$).

4. Полученные зависимости $X = f(R)$ допустимо использовать для дальнейшего исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт рассматриваемых регионов.

Используя полученные зависимости $X = b_0 + b_1R$ из таблицы 4.2, можно получить выражения для тока через человека в зависимости только от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт (с учетом зависимостей $X = f(R)$):

$$I_{\text{ч}} = \frac{U}{R_{\text{ч}} \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{(b_0 + b_1R)^2}\right)}}, \text{ мА.} \quad (4.11)$$

Для подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона эта зависимость при подстановке значения X , равного $1,54R - 2,12$, а также значений фазного напряжения ($U = 220 \text{ В}$) и сопротивления тела человека ($R_{\text{ч}} = 0,85 \text{ кОм}$) имеет вид:

$$I_{\text{ч}} = \frac{220}{0,85 \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 5,1)}{6,5 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{(1,54R - 2,12)^2}\right)}}}, \text{ мА.} \quad (4.12)$$

На рисунке 4.3 представлена полученная зависимость для условий подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона. Зависимости тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт других бассейнов и регионов приведены в приложении Д.

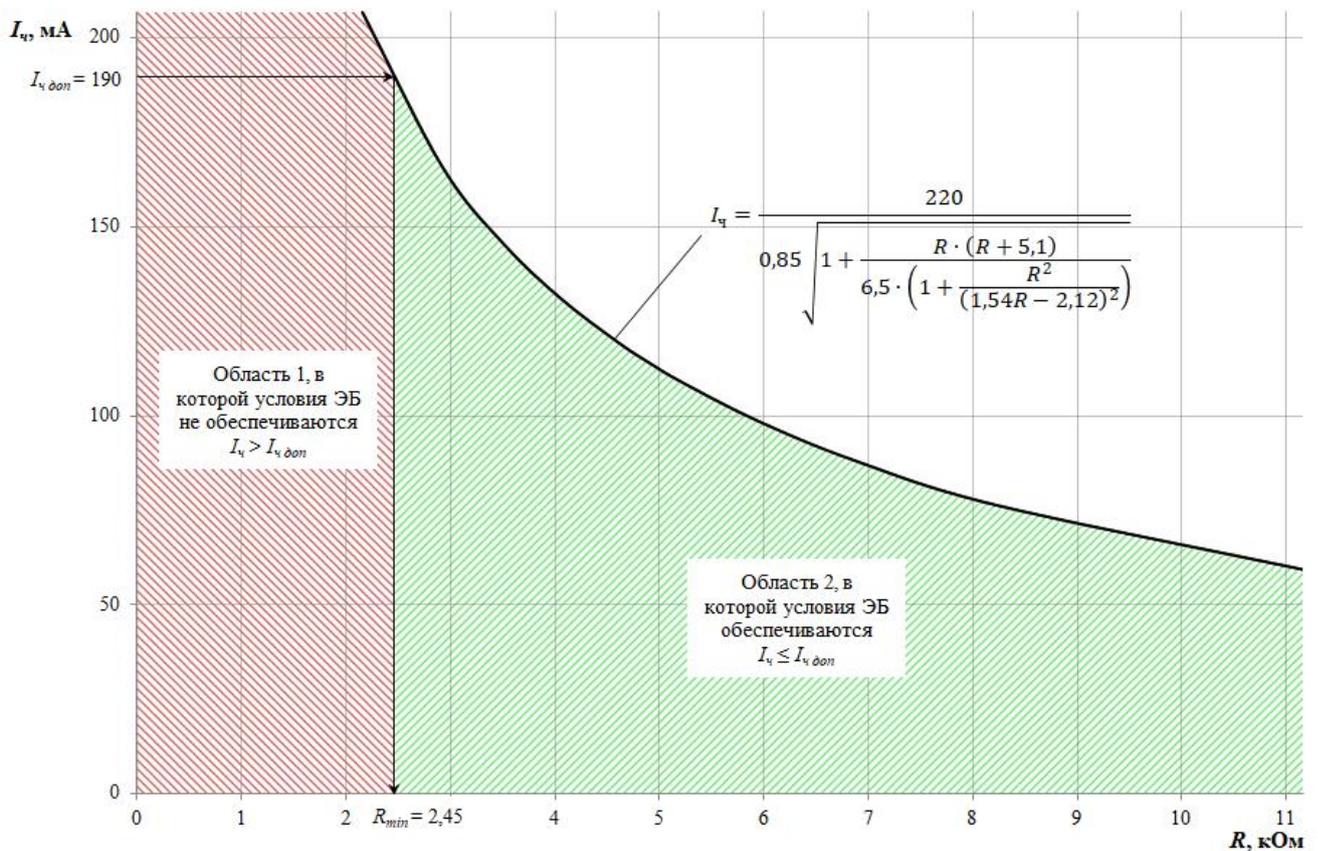


Рисунок 4.3 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Восточно-Сибирского региона

Используя значение допустимого тока через человека при времени воздействия 0,2 с ($I_{ч доп}$), можно получить области, в которых условия электробезопасности не обеспечиваются (область 1) и обеспечиваются (область 2).

Выражение 4.11 позволяет определить минимальное значение активного сопротивления изоляции R_{min} , определяющее границу указанных областей обеспечения условий электробезопасности. Для подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Восточно-Сибирского региона минимальное значение активного сопротивления изоляции – $R_{min} = 2,45$ кОм.

Вместе с этим, оценив значения $Z_{min} = 0,92$ кОм (4.2) и из выражения 4.11 $R_{min} = 2,45$ кОм, получаем по 2.55 значение X_{min} и по 2.56 максимальную емкость, которые не должны превышать для обеспечения условий электробезопасности.

В таблице 4.4 представлены значения минимального активного и емкостного сопротивлений изоляции, максимально допустимой емкости подземных электрических сетей, обуславливающие условия электробезопасности, при которых ток, протекающий через человека, не превышает $I_{ч доп}$.

Таблица 4.4 – Значения минимального активного и емкостного сопротивлений изоляции, максимально допустимой емкости подземных электрических сетей угольных шахт

Горнопромышленный район	R_{min} , кОм	X_{min} , кОм	C_{max} , мкФ
Кузнецкий бассейн	2,65	1,41	2,26
Печорский бассейн	4,45	1,16	2,74
Кизеловский бассейн	4	1,19	2,66
Норильский регион	7,7	1,04	3,05
Восточно-Сибирский регион	2,45	1,47	2,16
Якутский регион	1,5	2,38	1,34

Анализ представленных в таблице 4.4 данных позволяет отметить, что для подземных электрических сетей угольных шахт рассматриваемых регионов

максимальное значение емкости сети (C_{max}) превышает допустимое значение, равное 1 мкФ [85, 86].

4.3. Исследование условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях

Исследование условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях выполнено в условиях предприятий Норильского и Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит».

В соответствии с проведенным в главе 1 анализом электротравматизма, в рудничных подземных электрических сетях 84,4% электротравм происходит при однофазном прикосновении к токоведущим частям электроустановки, находящимся под напряжением (прямое прикосновение), 15,6% – при прикосновении к металлическим нетоковедущим частям электроустановки, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции (косвенное прикосновение). В этой связи представляется целесообразным исследовать условия электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях как при прямом, так и при косвенном прикосновении.

Для оценки вероятностных уровней обеспечения условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях в каждом из исследуемых регионов используем полученные в главе 3 законы распределения вероятностей (таблица 3.30). Оценку проведем для рудников комбината «Апатит», оценки для других регионов проводятся аналогичным образом.

Определим уровень обеспечения условий электробезопасности на примере рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит».

Распределение вероятности полного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит» соответствует гамма-закону распределения (таблица 3.30). Функция распределения (интегральный закон распределения) полного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит» имеет вид

$$F(Z) = \frac{1}{0,93} \int_0^Z Z^{1,13} e^{-\frac{Z}{0,94}} dZ \quad (4.13)$$

С применением выражения 4.13 определяется вероятность обеспечения требуемых условий электробезопасности в рудничных подземных сетях комбината «Апатит» при сопротивлении Z_{min} , обеспечивающим безопасный ток при времени воздействия 0,2 с. Допустимое сопротивление Z_{min} , определенное по выражению 2.41 при наихудших условиях возникновения электротравмы ($r_{п} = 0, r_{об} = 0$) и протекания тока через тело человека, не превышающего $I_{ч доп}$, равно 0,92 кОм. Это сопротивление обусловлено уровнем питающего напряжения (U), безопасным током через человека ($I_{ч доп}$) и сопротивлением тела человека ($R_{ч}$).

Выражение 4.13 позволяет определить вероятностный уровень электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях комбината «Апатит», при котором условия электробезопасности не обеспечиваются (2.42), а именно:

$$F_{H0}(Z) < F(Z_{min}) = 0,387 \text{ или } 38,7 \%. \quad (4.14)$$

С использованием выражения 2.43 вычисляется вероятностный уровень обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт предприятий Восточно-Сибирского региона:

$$F_0(Z) \geq F(Z_{min}) = 0,613 \text{ или } 61,3 \%. \quad (4.15)$$

На рисунке 4.4 представлена графическая интерпретация определения уровня обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях предприятий Восточно-Сибирского региона.

На рисунке 4.4 можно выделить две характерные области, отражающие обеспечение условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях комбината «Апатит»:

- Область 1, в которой условия электробезопасности не обеспечиваются – $F_{H0}(Z) < F(Z_{min})$;
- Область 2, в которой условия электробезопасности обеспечиваются – $F_0(Z) \geq F(Z_{min})$.

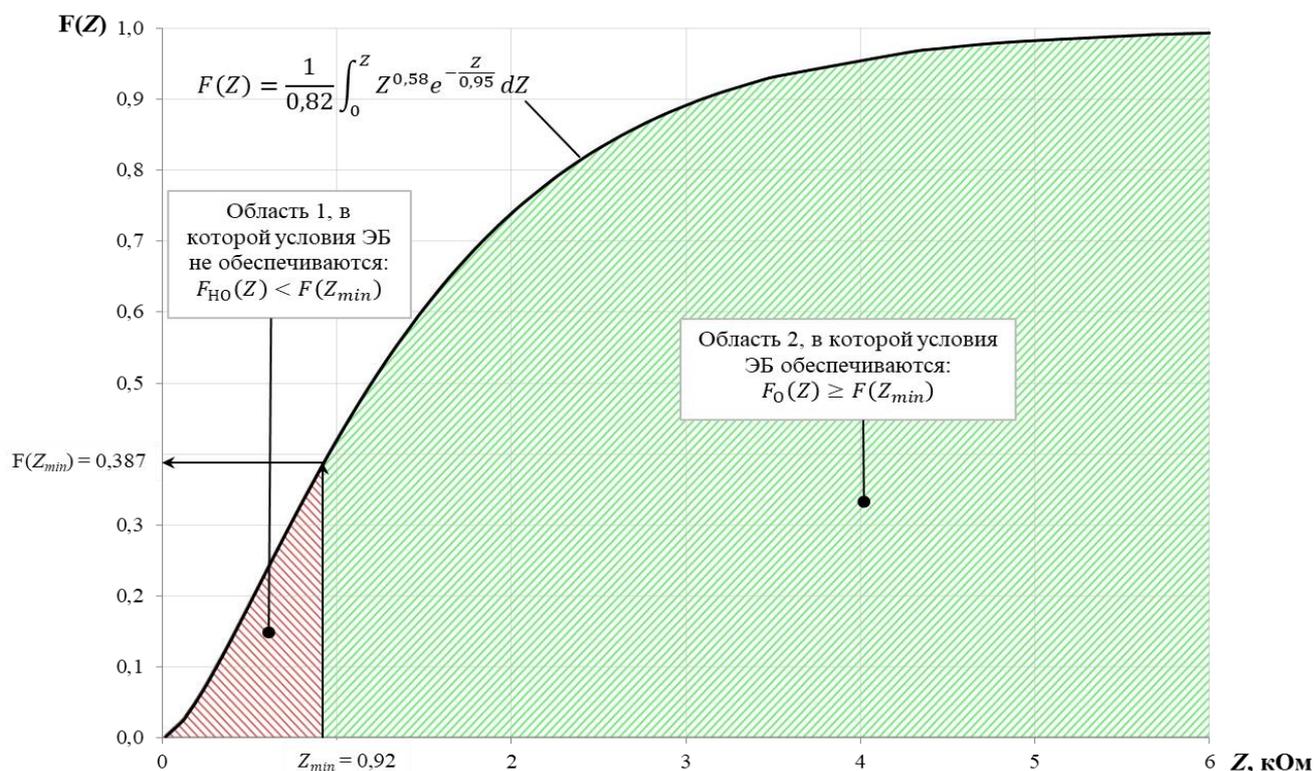


Рисунок 4.4 – Области условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях комбината «Апатит», обусловленные полным сопротивлением изоляции

Техническая интерпретация вероятностного уровня обеспечения электробезопасности показывает, какой процент электрических сетей обеспечивает условия электробезопасности в подземных выработках рудников соответствующего региона.

Вероятностные уровни обеспечения условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях Норильского и Восточно-Сибирского регионов приведены в таблице 4.5.

Таблица 4.5 – Уровни обеспечения условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях

Горнопромышленный район	Уровни обеспечения условий электробезопасности	
	$F_0(Z), \%$	$F_{НО}(Z), \%$
Норильский регион	89,4	10,6
Комбинат «Апатит»	61,3	38,7
Восточная Сибирь	89,6	10,4

Анализ данных о вероятностных уровнях обеспечения электробезопасности (таблица 4.5) позволяет сделать выводы:

1. Условия электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях предприятий Норильского региона, Восточной Сибири и комбината «Апатит» с 95-% вероятностью не обеспечиваются.

2. Наибольшая доля электрических сетей (38,7 %), в которых условия электробезопасности не обеспечены, соответствует электрическим сетям комбината «Апатит».

3. Для повышения условий электробезопасности в подземных выработках рудников необходимо обеспечить повышение значения полного сопротивления изоляции электрических сетей до минимального значения, равного 0,92 кОм.

В рамках трехэлементной системы электробезопасности целесообразно оценить зависимость поражающего фактора (тока через человека при его прикосновении к фазному проводнику) от активного и емкостного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей. При этом целесообразно выразить емкостное сопротивление изоляции через активное сопротивление изоляции, упрощая при этом выражение 2.39.

Зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции электрических сетей определим в виде корреляционных зависимостей на основе функций распределения вероятностей активного и емкостного сопротивлений для горных предприятий исследуемых регионов (таблицы 3.28, 3.29).

Для этого составим два сопряженных вариационных ряда значений активного и емкостного сопротивлений, вычисленных по функциям распределения вероятностей $F(R)$ и $F(X)$ с шагом расчета 0,01. Таким образом получим 100 пар сопряженных равновероятностных значений активного и емкостного сопротивлений изоляции для предприятий определенного региона.

На рисунке 4.5 представлено корреляционное поле для нахождения искомой зависимости емкостного сопротивления изоляции от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит».

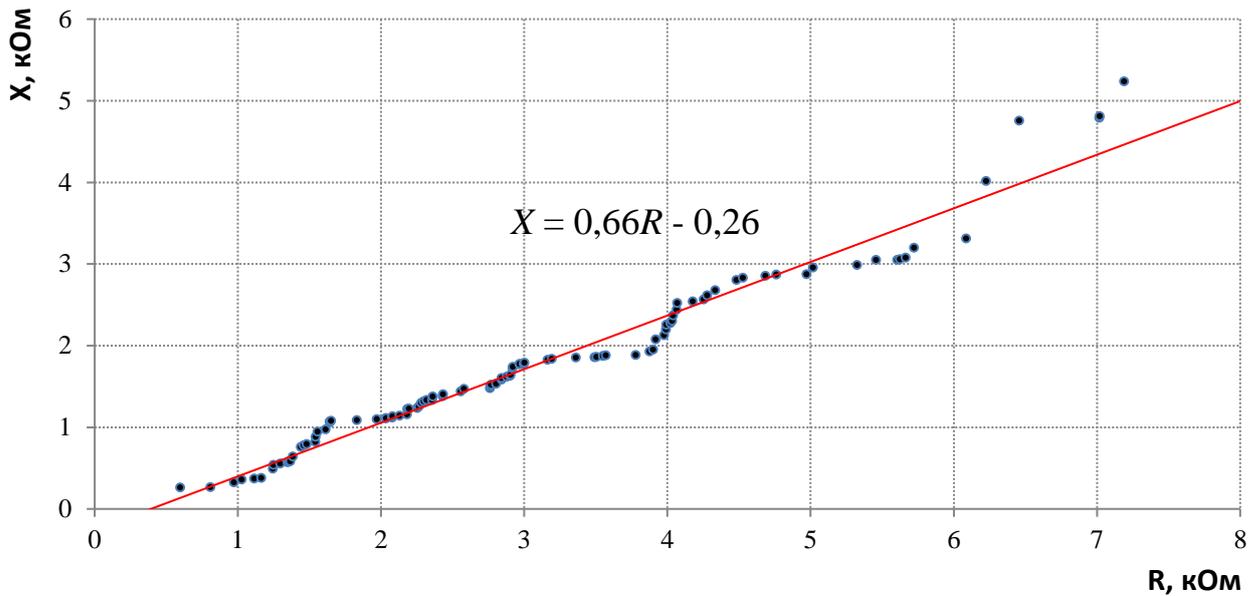


Рисунок 4.5 – Корреляционное поле и зависимость емкостного от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит»

Определенное с использованием МНК уравнение зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит» имеет вид:

$$X = 0,66R - 0,26, \text{ кОм.} \quad (4.16)$$

Теснота связи между емкостным и активным сопротивлениями изоляции для выражения 4.16 оценена с помощью коэффициентов парной линейной корреляции и детерминации. Значение коэффициента парной линейной корреляции, вычисленное по выражению 2.48, равно:

$$r_{RX} = \frac{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})(X_i - \bar{X})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_i - \bar{R})^2 \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}} = \frac{155,79}{\sqrt{237,26 \cdot 106}} = 0,982. \quad (4.17)$$

Значение коэффициента детерминации, определенное с использованием выражения 2.49, равно:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{X}_i - \bar{X})^2}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} = \frac{102,3}{106} = 0,965. \quad (4.18)$$

Значение коэффициентов, близкие к единице, соответствуют тесной связи между активным и емкостным сопротивлениями изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит». По шкале Чеддока связь характеризуется как весьма высокая.

Математическая точность полученной зависимости 4.16 оценивается средней относительной ошибкой аппроксимации, определяемой с использованием выражения 2.51. Указанная ошибка для выражения 4.16 равна:

$$A = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_i - \hat{X}_i}{X_i} \right| \cdot 100\% = \frac{1}{100} |-0,07| \cdot 100\% = 0,07\%. \quad (4.19)$$

Значение относительной ошибки аппроксимации, равное 0,07%, по шкале Чеддока соответствует высокой математической точности уравнения зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит».

Зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции $X = f(R)$, а также оценки тесноты связи между параметрами зависимости и их математической точности, приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Горнопромышленный район	Зависимость $X = f(R)$	r_{RX}	Качественная оценка тесноты связи	R^2	A, %	Качественная оценка математической точности
Норильский регион	$X = 0,45R - 0,87$	0,987	весьма высокая	0,975	3,05	высокая
Комбинат «Апатит»	$X = 0,66R - 0,26$	0,982	весьма высокая	0,965	0,07	высокая
Восточно-Сибирский регион	$X = 1,31R - 0,24$	0,995	весьма высокая	0,99	3,9	высокая

Статистическая значимость коэффициента парной линейной корреляции, определенного для выражения 4.16, оценена с использованием t-критерия Стьюдента. Расчетное значение критерия ($t_{\text{расч}}$), вычисленное с использованием выражения 2.50, равно:

$$t_{\text{расч}} = \frac{r_{RX}}{\sqrt{1 - r_{RX}^2}} \sqrt{n - 2} = \frac{0,982}{\sqrt{1 - 0,965^2}} \sqrt{100 - 2} = 52. \quad (4.20)$$

Расчетное значение t-критерия (4.20), больше табличного значения ($t_{\text{табл}}$), определенного по таблице критических значений распределения Стьюдента и равного 1,98. В этой связи коэффициент парной линейной корреляции для выражения 4.16 является статистически значимым.

Для проверки статистической значимости зависимости в целом использован F-критерий Фишера. Расчетное значение критерия ($F_{\text{расч}}$), вычисленное по 2.52, для выражения 4.16 равно:

$$F_{\text{расч}} = \frac{R^2}{1 - R^2} (n - 2) = \frac{0,965}{1 - 0,965} (100 - 2) = 2704,34. \quad (4.21)$$

Расчетное значение критерия (4.21) многократно превышает табличное значение ($F_{\text{табл}}$), определенное по таблице критических значений распределения Фишера-Снедекора и равное 3,94. В связи с этим, зависимость емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит» признается статистически значимой в целом.

Оценка статистической значимости параметров парной линейной зависимости (b_0 и b_1) произведена с использованием t-критерия Стьюдента. Для выражения 4.16 расчетные значения критериев для свободного члена (b_0) и коэффициента линейной зависимости (b_1), вычисленные с использованием выражения 2.53, равны:

$$\begin{aligned} t_{b_0} &= \left| \frac{b_0}{m_{b_0}} \right| = \left| \frac{-0,26}{0,04} \right| = 6,62; \\ t_{b_1} &= \left| \frac{b_1}{m_{b_1}} \right| = \left| \frac{0,66}{0,02} \right| = 34,76. \end{aligned} \quad (4.22)$$

Расчетные значения t-критерия (4.22) больше табличного значения t-критерия ($t_{b \text{ табл}}$), определенного по таблице критических значений распределения Стьюдента и равного 1,98. В этой связи параметры парной линейной зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит» (4.16) являются статистически значимыми.

Оценка статистической значимости коэффициентов парной корреляции между емкостным сопротивлением и активным сопротивлением изоляции рудничных подземных электрических сетей (r_{RX}), зависимостей $X = f(R)$, а также параметров парных линейных зависимостей (b_0 и b_1) рассматриваемых регионов приведена в таблице 4.7.

Таблица 4.7 – Оценка статистической значимости зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей

Горнопромышленный район	Коэффициент парной линейной корреляции		Зависимость $X = f(R)$		Параметры парной линейной зависимости		
	$t_{\text{расч}}$	$t_{\text{табл}}$	$F_{\text{расч}}$	$F_{\text{табл}}$	t_{b_0}	t_{b_1}	$t_{b \text{ табл}}$
Норильский регион	61,38	1,98	3767,83	3,94	15,2 3	28,09	1,98
Комбинат «Апатит»	52,0	1,98	2704,34	3,94	6,62	34,76	1,98
Восточно-Сибирский регион	99,31	1,98	9862,39	3,94	2,83	130,9 5	1,98

Из анализа данных, представленных в таблицах 4.6 и 4.7, следует:

1. Коэффициенты парной линейной корреляции зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей принимают значения в диапазоне $0,982 \div 0,995$, что свидетельствует о тесной связи между активным и емкостным сопротивлениями изоляции подземных электрических сетей.

2. Средняя относительная ошибка аппроксимации для зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей не превышает значения 10%, что свидетельствует о высокой математической точности полученных уравнений.

3. Статистическая значимость коэффициентов парной корреляции между емкостным сопротивлением и активным сопротивлением изоляции рудничных подземных электрических сетей (r_{RX}), зависимостей $X = f(R)$, а также параметров парных линейных зависимостей (b_0 и b_1) рассматриваемых регионов подтверждается положительными результатами проверок ($t_{\text{расч}} > t_{\text{табл}}$, $F_{\text{расч}} > F_{\text{табл}}$, $t_{b_0} > t_{b_{\text{табл}}}$, $t_{b_1} > t_{b_{\text{табл}}}$).

4. Полученные зависимости $X = f(R)$ допустимо использовать для дальнейшего исследования условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях рассматриваемых регионов.

Используя полученные зависимости $X = b_0 + b_1R$ из таблицы 4.6, можно получить выражения для тока через человека в зависимости только от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей (с учетом зависимостей $X = f(R)$):

$$I_{\text{ч}} = \frac{U}{R_{\text{ч}} \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{(b_0 + b_1R)^2}\right)}}, \text{ мА.} \quad (4.23)$$

Для рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит» эта зависимость при подстановке значения X , равного $0,66R - 0,26$, а также значений фазного напряжения ($U = 220$ В) и сопротивления тела человека ($R_{\text{ч}} = 0,85$ кОм) имеет вид:

$$I_{\text{ч}} = \frac{220}{0,85 \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 5,1)}{6,5 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{(0,66R - 0,26)^2}\right)}}, \text{ мА.} \quad (4.24)$$

На рисунке 4.6 представлена полученная зависимость для условий рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит». Зависимости тока через человека от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей других регионов приведены в приложении Е.

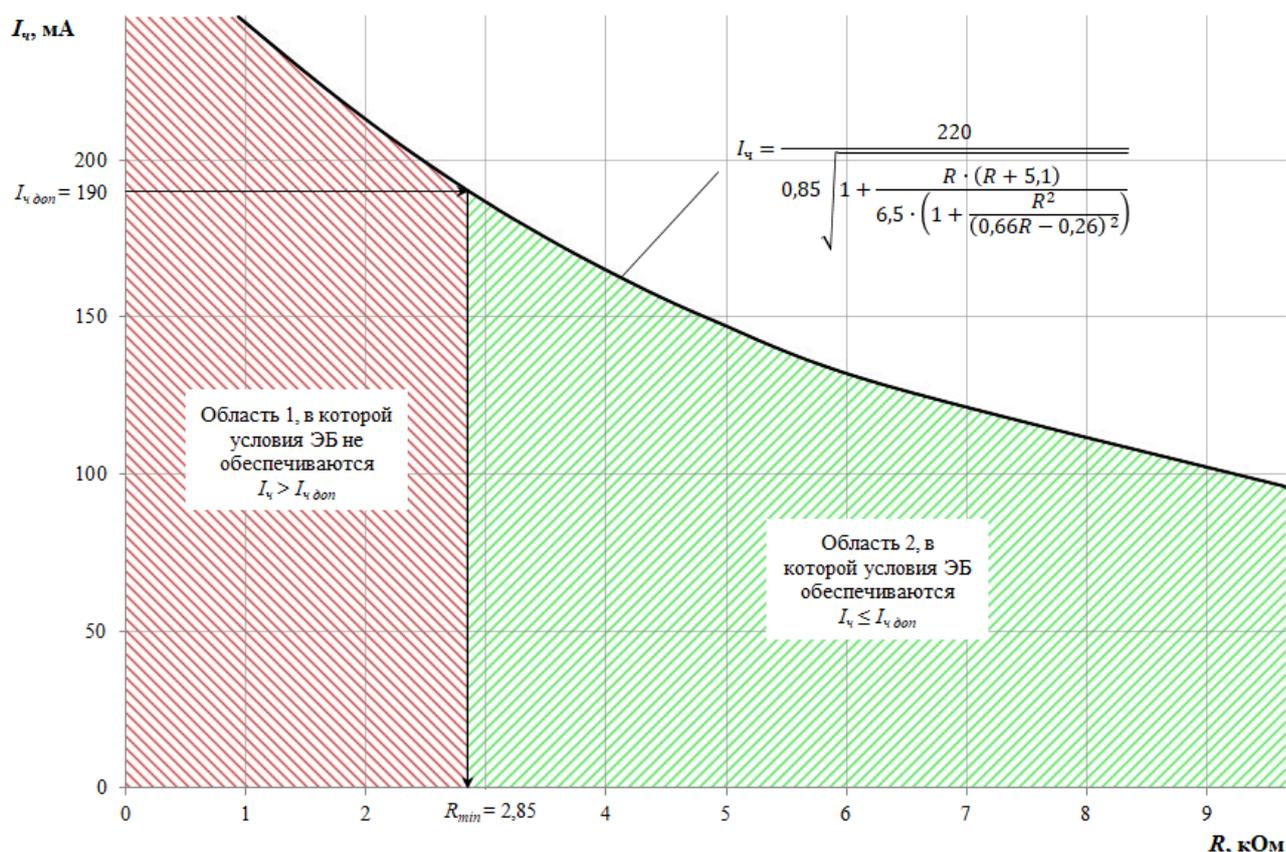


Рисунок 4.6 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит»

Используя значение допустимого тока через человека при времени воздействия 0,2 с ($I_{ч доп}$), можно получить области, в которых условия электробезопасности не обеспечиваются (область 1) и обеспечиваются (область 2).

Выражение 4.23 позволяет определить минимальное значение активного сопротивления изоляции R_{min} , определяющее границу указанных областей обеспечения условий электробезопасности. Для рудничных подземных

электрических сетей комбината «Апатит» минимальное значение активного сопротивления изоляции – $R_{min} = 2,85$ кОм.

Вместе с этим, оценив значения $Z_{min} = 0,92$ кОм (4.14) и из выражения 4.23 $R_{min} = 2,85$ кОм, получаем по 2.55 значение X_{min} и по 2.56 максимальную емкость, которые не должны превышать для обеспечения условий электробезопасности.

В таблице 4.8 представлены значения минимального активного и емкостного сопротивлений изоляции, максимально допустимой емкости подземных электрических сетей, обуславливающие условия электробезопасности, при которых ток, протекающий через человека, не превышает $I_{ч доп}$.

Таблица 4.8 – Значения минимального активного и емкостного сопротивлений изоляции, максимально допустимой емкости рудничных подземных электрических сетей

Горнопромышленный район	R_{min} , кОм	X_{min} , кОм	C_{max} , мкФ
Норильский регион	5,95	1,09	2,92
Комбинат «Апатит»	2,85	1,36	2,34
Восточно-Сибирский регион	1,5	2,38	1,34

Анализ представленных в таблице 4.8 данных позволяет отметить, что для рудничных подземных электрических сетей рассматриваемых регионов максимальное значение емкости сети (C_{max}) превышает допустимое значение, равное 1 мкФ [85, 86].

4.4. Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников при косвенном прикосновении

При исследовании условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников при косвенном прикосновении с использованием выражения 2.61 определяется значения тока, протекающего через тело человека, и сравниваются с длительно допустимым значением тока $I_{ч дл. доп} = 6$ мА [21]. При определении с использованием выражения 2.61 значений тока,

протекающего через человека, коэффициенты α_1 и α_2 принимаются равными 1 (человек находится не в зоне растекания тока, а переходные сопротивления в цепи тока через тело человека $r_{п}$ и $r_{об}$ равны нулю). Сопротивление заземляющего устройства R_3 принимается равным 2 Ома [85, 86]. Значение полного сопротивления изоляции Z принимается равным $Z_{min} = 0,92$ кОм. С учетом изложенного выше значения тока, протекающего через тело человека при косвенном прикосновении, для предприятий всех горнопромышленных районов одинаковы и определяются по выражению:

$$I_{ч} = \frac{3UR_3\alpha_1\alpha_210^3}{R_{ч}(3R_3 + Z)} = \frac{3 \cdot 220 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 10^3}{0,85 \cdot (3 \cdot 2 + 0,92)} = 1,68 \text{ мА.} \quad (4.25)$$

Вычисленное по выражению 4.25 значение тока, длительно протекающего через тело человека при косвенном прикосновении в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников, не превышает длительно допустимого значения тока $I_{ч \text{ дл. доп}} = 6$ мА. В соответствии с изложенным в подземных электрических сетях угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов, а также в рудничных подземных электрических сетях предприятий Норильского, Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит», условия электробезопасности при прикосновении к нетоковедущим частям электроустановки, находящимся под напряжением, будут обеспечены, если полное сопротивление изоляции $Z_{min} \geq 0,92$ кОм и сопротивление заземляющего устройства $R_3 \leq 2$ Ом.

4.5. Выводы

Проведенное в настоящей главе исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях рудников и угольных шахт позволяет сделать выводы:

1. Предложены методические принципы исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях рудников и угольных шахт предприятий горной отрасли. Разработанные методические принципы

исследования условий электробезопасности целесообразно использовать не только применительно к условиям подземных электрических сетей предприятий горной отрасли, но и для других предприятий, где для обеспечения электропитания применяются электрические сети с изолированным режимом нейтрали.

2. Получены устойчивые предельные минимальные значения полного и активного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов. Предельные минимальные значения показали, что условия электробезопасности с вероятностью 95% обеспечиваются лишь для подземных электрических сетей Якутского региона. Для обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского и Восточно-Сибирского регионов необходимо увеличивать полное сопротивление изоляции Z_{min} до значения 0,92 кОм.

3. Получены зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов. Анализ зависимостей показал, что они статистически значимы, и их целесообразно использовать для нахождения максимальных значений емкости подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов.

4. Определены значения максимальной емкости подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов при которых обеспечиваются условия электробезопасности. Анализ полученных значений показал, что C_{max} для рассматриваемых районов превышает допустимое значение, равное 1 мкФ. В соответствии с этим, для обеспечения условий

электробезопасности и выполнения требований нормативных документов в подземных электрических сетях угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов необходимо применять устройства компенсации емкостных токов утечки.

5. Получены устойчивые предельные минимальные значения полного и активного сопротивлений изоляции рудничных подземных электрических сетей предприятий Норильского региона, комбината «Апатит» и Восточной Сибири. Предельные минимальные значения показали, что условия электробезопасности с вероятностью 95% не обеспечиваются. Для обеспечения условий электробезопасности в рудничных подземных электрических сетях предприятий Норильского региона, комбината «Апатит» и Восточной Сибири необходимо увеличивать полное сопротивление изоляции Z_{min} до значения 0,92 кОм.

6. Получены зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетях предприятий Норильского региона, комбината «Апатит» и Восточной Сибири. Анализ зависимостей показал, что они статистически значимы, и их целесообразно использовать для нахождения максимальных значений емкости рудничных подземных электрических сетях предприятий Норильского региона, комбината «Апатит» и Восточной Сибири.

7. Определены значения максимальной емкости рудничных подземных электрических сетях предприятий Норильского региона, комбината «Апатит» и Восточной Сибири при которых обеспечиваются условия электробезопасности. Анализ полученных значений показал, что C_{max} для рассматриваемых районов превышает допустимое значение, равное 1 мкФ. В соответствии с этим, для обеспечения условий электробезопасности и выполнения требований нормативных документов в рудничных подземных электрических сетях предприятий Норильского региона, комбината «Апатит» и Восточной Сибири необходимо применять устройства компенсации емкостных токов утечки.

8. Исследование условий электробезопасности при косвенном прикосновении в подземных электрических сетях рудников и угольных шахт показало, что при обеспечении полного сопротивления изоляции $Z_{min} \geq 0,92$ кОм и сопротивления заземляющего устройства $R_3 \leq 2$ Ом, условия электробезопасности в подземных электрических сетях рудников и угольных шахт обеспечиваются. В соответствии с вышеизложенным при отказе или неработоспособности реле защиты от утечек тока на землю в подземных электрических сетях рудников и угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов, комбината «Апатит» и Восточной Сибири, условия электробезопасности будут обеспечены при соблюдении значений полного сопротивления изоляции Z_{min} и сопротивления заземляющего устройства R_3 .

Глава 5. Разработка рекомендаций по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий

5.1. Исходные положения

Повышение условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий целесообразно выполнять на основе:

1. Методических принципов и методик исследования параметров изоляции и условий электробезопасности с учетом вероятностного подхода.

2. Оценок параметров изоляции подземных электрических сетей, являющихся основным средством обеспечения электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, с учетом их случайного характера, выраженного в вероятностных законах распределения полного, активного, емкостного сопротивлений, а также емкости сети относительно земли.

3. Оценок условий электробезопасности с учетом вероятностных уровней обеспечения электробезопасности, установления областей электробезопасности с учетом параметров изоляции и допустимого тока через человека.

В этой связи на основании результатов выполненного диссертационного исследования разработан алгоритм, который позволяет оценить условия электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

5.2. Рекомендации по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий

5.2.1. Алгоритм оценки условий электробезопасности

Алгоритм оценки условий электробезопасности приведен на схеме рисунка 5.1.

Указанный алгоритм состоит из четырех блоков. Каждый блок состоит из операций и описывает определенную последовательность действий при оценке условий электробезопасности с целью его обеспечения в подземных электрических

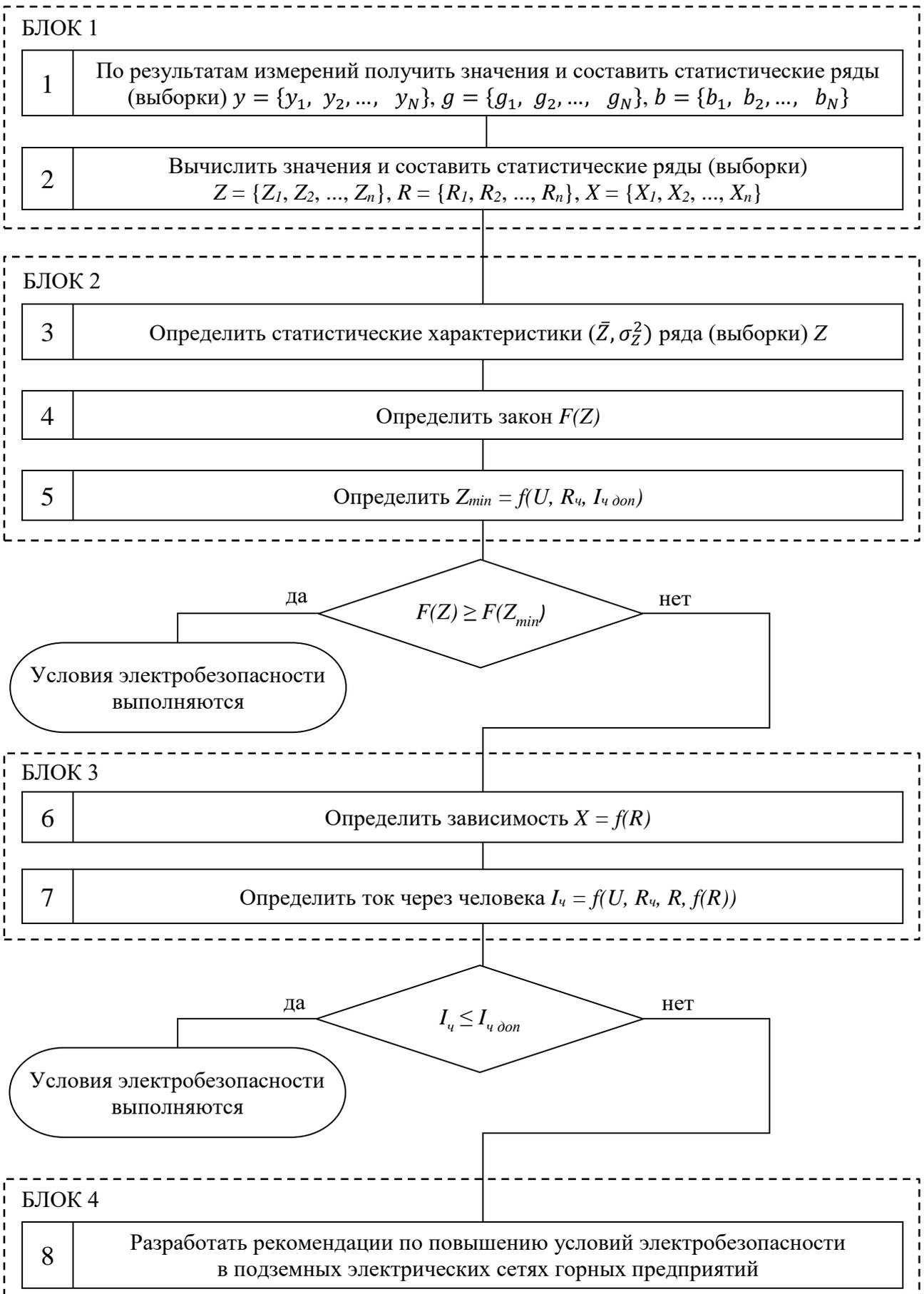


Рисунок 5.1 – Алгоритм оценки условий электробезопасности

сетях горных предприятий.

БЛОК 1 состоит из следующих операций:

Операция 1. Измерение значений параметров проводимости изоляции (полной проводимости – y , активной проводимости – g , емкостной проводимости – b) исследуемых сетей, которое следует проводить посредством измерений указанных выше параметров изоляции в рабочих условиях подземных электрических сетей.

В подземных электрических сетях напряжением до 1 кВ следует использовать фазочувствительные методы определения параметров проводимости изоляции. Указанные методы позволяют:

- определить полную проводимость (y) изоляции всей сети и проводимости изоляции отдельных фаз;
- определить активную (g) и емкостную (b) составляющие полной проводимости изоляции сети;
- определить несимметрию проводимости изоляции электроустановок;
- осуществить сигнализацию при снижении уровня сопротивления изоляции до контрольного предела;
- осуществить автоматизацию контроля.

Измерения должны производиться в периоды наиболее напряженной работы технологических участков, когда подключены все или подавляющее большинство электроустановок. Такая необходимость вызвана тем, что минимальный уровень сопротивления изоляции сетей может быть зафиксирован только при указанных выше условиях работы. В этой связи предлагается измерение параметров изоляции в подземных электрических сетях горных предприятий проводить непосредственно после окончания смены, когда большая часть электрооборудования на технологическом участке еще подключена к сети, но уже не находится в работе.

Используя измеренные значения параметров проводимости изоляции сформировать статистические выборки:

- полной проводимости – $y = \{y_1, y_2, \dots, y_N\}$;

- активной проводимости – $g = \{g_1, g_2, \dots, g_N\}$;
- емкостной проводимости – $b = \{b_1, b_2, \dots, b_N\}$,

где N – количество значений ряда.

Операция 2. Обработка полученного в Операции 1 статистического материала для последующего его использования при оценке условий электробезопасности. Следует вычислить значения сопротивлений изоляции, исходя из определенных значений проводимостей:

- полного сопротивления – $Z_j = \frac{1}{y_j}$, кОм, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$;
- активного сопротивления – $R_j = \frac{1}{g_j}$, кОм, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$;
- емкостного сопротивления – $X_j = \frac{1}{b_j}$, кОм, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$.

Используя вычисленные по вышеприведенным выражениям значения сопротивлений изоляции, необходимо сформировать статистические выборки:

- полного сопротивления – $Z = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_N\}$;
- активного сопротивления – $R = \{R_1, R_2, \dots, R_N\}$;
- емкостного сопротивления – $X = \{X_1, X_2, \dots, X_N\}$.

БЛОК 2 состоит из следующих операций:

Операция 3. Определение статистических характеристик статистической выборки полного сопротивления изоляции: средневзвешенного значения (\bar{Z}) и дисперсии (σ_Z^2). Вычисления следует выполнять по нижеприведенному алгоритму:

1. Сформированный в Операции 2 вариационный ряд полного сопротивления изоляции Z необходимо преобразовать в интервальный вариационный ряд. Для этого следует определить оптимальное количество интервалов ряда n

$$n = 1 + 3,2 \log N \quad (5.1)$$

и их оптимальную длину

$$h = \frac{Z_{max} - Z_{min}}{n}, \text{ кОм}, \quad (5.2)$$

где Z_{min} , Z_{max} – соответственно, минимальное и максимальное значения статистической выборки Z .

2. Требуется определить середины i -ых интервалов Z_i по выражению

$$Z_i = \frac{Z_{min\ i} + Z_{max\ i}}{2}, \text{ кОм}, \quad (5.3)$$

где $Z_{min\ i}$, $Z_{max\ i}$ – соответственно, минимальное и максимальное значения i -го интервала, кОм, $i \in \{1, 2, \dots, n\}$.

3. Следует определить частоты интервалов P_i по выражению

$$P_i = \frac{N_i}{N}, \quad (5.4)$$

где N_i – количество значений в i -м интервале.

4. Необходимо вычислить средневзвешенное значение вариационного ряда полного сопротивления изоляции \bar{Z} по выражению

$$\bar{Z} = \sum_{i=1}^n Z_i P_i, \text{ кОм}. \quad (5.5)$$

5. Дисперсию вариационного ряда полного сопротивления изоляции σ_Z^2 следует определять по выражению

$$\sigma_Z^2 = \sum_{i=1}^n (Z_i - \bar{Z})^2 P_i, \text{ кОм}^2. \quad (5.6)$$

Результаты расчетов по п.п. 1-5 следует занести в таблицу 5.1, являющуюся модернизированным вариантом таблицы 3.3, приведенной в гл. 3 диссертационной работы.

Таблица 5.1 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей

Интервалы полного сопротивления изоляции i	Минимальн ое значение интервала $Z_{min\ i}$, кОм	Максимально е значение интервала $Z_{max\ i}$, кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Кол-во вариант в интервале N_i	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
1	$Z_{min\ 1}$	$Z_{max\ 1}$	Z_1	N_1	P_1	$Z_1 P_1$	$(Z_1 - \bar{Z})^2 \cdot P_1$
2	$Z_{min\ 2}$	$Z_{max\ 2}$	Z_2	N_2	P_2	$Z_2 P_2$	$(Z_2 - \bar{Z})^2 \cdot P_2$
...
n	$Z_{min\ n}$	$Z_{max\ n}$	Z_n	N_n	P_n	$Z_n P_n$	$(Z_n - \bar{Z})^2 \cdot P_n$
-	-	-	-	N	$\sum_1^n P_i = 1,0$	\bar{Z}	σ_Z^2

Операция 4. Установление вероятностного закона распределения полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей.

В настоящей диссертационной работе показано, что полное сопротивление изоляции подземных электрических сетей соответствует логнормальному или гамма распределению, плотности распределения вероятности (дифференциальные законы) которых описываются выражениями (5.7) и (5.8) соответственно

$$f_{\text{Л}}(Z) = \frac{1}{Z\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln Z - \mu)^2}{2\sigma^2}}; \quad (5.7)$$

$$f_{\Gamma}(Z) = Z^{\alpha-1} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{\beta}}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}, \quad (5.8)$$

где $\Gamma(\alpha) = \int_0^{\infty} Z^{\alpha-1} e^{-Z} dZ$ – гамма-функция Эйлера.

Установление закона распределения полного сопротивления изоляции следует выполнять по нижеприведенному алгоритму:

1. Используя полученные в Операции 3 средневзвешенное значение (\bar{Z}) и дисперсию (σ_Z^2) из системы уравнений (2.12) следует определить параметры μ и σ^2 логнормального закона

$$\begin{cases} \bar{Z} = e^{\mu + \frac{\sigma^2}{2}}; \\ \sigma_Z^2 = (e^{\sigma^2} - 1)e^{2\mu + \sigma^2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \mu = \ln \left(\frac{\bar{Z}}{\sqrt{\frac{\sigma_Z^2}{\bar{Z}^2} + 1}} \right); \\ \sigma^2 = \ln \left(\frac{\sigma_Z^2}{\bar{Z}^2} + 1 \right), \end{cases} \quad (5.9)$$

и из системы уравнений (2.14) – параметры α и β гамма распределения

$$\begin{cases} \bar{Z} = \alpha \cdot \beta; \\ \sigma_Z^2 = \alpha \cdot \beta^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha = \frac{\bar{Z}^2}{\sigma_Z^2}; \\ \beta = \frac{\sigma_Z^2}{\bar{Z}}. \end{cases} \quad (5.10)$$

2. Требуется вычислить значения плотности распределения вероятности рассматриваемых дифференциальных законов для каждого интервала вариационного интервального ряда Z по выражениям

$$f_L(Z_i) = \frac{1}{Z_i \sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln Z_i - \mu)^2}{2\sigma^2}}; \quad (5.11)$$

$$f_\Gamma(Z_i) = Z_i^{\alpha-1} \cdot \frac{e^{-\frac{Z_i}{\beta}}}{\beta^\alpha \Gamma(\alpha)}, \quad (5.12)$$

3. Необходимо определить теоретические частоты i -ых интервалов вариационного интервального ряда Z для логнормального и гамма законов распределения по выражениям (5.13) и (5.14), соответственно

$$P_{iL} = \frac{f_L(Z_i)}{\sum_{i=1}^n f_L(Z_i)}, \quad (5.13)$$

$$P_{i\Gamma} = \frac{f_\Gamma(Z_i)}{\sum_{i=1}^n f_\Gamma(Z_i)}. \quad (5.14)$$

4. Требуется определить наблюдаемые значения критерия согласия Пирсона $\chi_{\text{набл}}^2$ для логнормального и гамма распределений по выражениям (5.15) и (5.16), соответственно

$$\chi_{\text{набл}L}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(N_i - N \cdot P_{iL})^2}{N \cdot P_{iL}}, \quad (5.15)$$

$$\chi_{\text{набл}\Gamma}^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(N_i - N \cdot P_{i\Gamma})^2}{N \cdot P_{i\Gamma}}. \quad (5.16)$$

5. Следует установить критическое значение критерия согласия Пирсона для уровня значимости 5% и числа степеней свободы $k = n - 3$ из таблицы 5.2.

Таблица 5.2 – Критические значения критерия согласия Пирсона $\chi_{5\%,k}^2$

Число степеней свободы k	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Значение критерия $\chi_{5\%,k}^2$	3,8	6,0	7,8	9,5	11,1	12,6	14,1	15,5	16,9	18,3	19,7	21,0

6. Определенные в п. 4 наблюдаемые значения критерия согласия $\chi_{\text{набл}L}^2$ и $\chi_{\text{набл}\Gamma}^2$ необходимо сравнить с установленным в п. 5 критическим значением критерия $\chi_{5\%,k}^2$.

$$\begin{cases} \chi_{\text{набл Л}}^2 \leq \chi_{5\%,k}^2; \\ \chi_{\text{набл Г}}^2 \leq \chi_{5\%,k}^2. \end{cases} \quad (5.17)$$

$$\begin{cases} \chi_{\text{набл Л}}^2 \leq \chi_{5\%,k}^2; \\ \chi_{\text{набл Г}}^2 > \chi_{5\%,k}^2. \end{cases} \quad (5.18)$$

$$\begin{cases} \chi_{\text{набл Л}}^2 > \chi_{5\%,k}^2; \\ \chi_{\text{набл Г}}^2 \leq \chi_{5\%,k}^2. \end{cases} \quad (5.19)$$

Если выполняется система неравенств (5.17), то следует принять закон распределения полного сопротивления изоляции, которому соответствует меньшее наблюдаемое значение критерия согласия Пирсона.

Если выполняется система неравенств (5.18), то для вариационного ряда полного сопротивления изоляции следует принять логнормальный закон распределения.

Если выполняется система неравенств (5.19), то для вариационного ряда полного сопротивления изоляции следует принять гамма закон распределения.

Операция 5. Определение минимального значения полного сопротивления изоляции $Z_{min} = f(U, R_{\text{ч}}, I_{\text{ч доп}})$ и нахождение с использованием вероятностного закона распределения полного сопротивления изоляции, полученного в Операции 4, условий выполнения условий электробезопасности. Для этого следует руководствоваться нижеприведенным алгоритмом:

1. Следует по выражению определить минимальное значение полного сопротивления изоляции Z_{min} , при котором будет обеспечен безопасный ток через человека $I_{\text{ч доп}}$, по выражению

$$Z_{min} = \frac{3[U - I_{\text{ч доп}}(R_{\text{ч}} + R_{\text{пер}})]}{I_{\text{ч доп}}}, \text{ кОм.} \quad (5.20)$$

2. Необходимо построить графическую интерпретацию определенного в Операции 4 закона распределения полного сопротивления изоляции (логнормального или гамма) в виде функции распределения $F(Z)$, и, используя полученное в п. 1 минимальное значение полного сопротивления изоляции Z_{min} , графически определить значение функции $F(Z_{min})$ (см. рисунок 5.2).

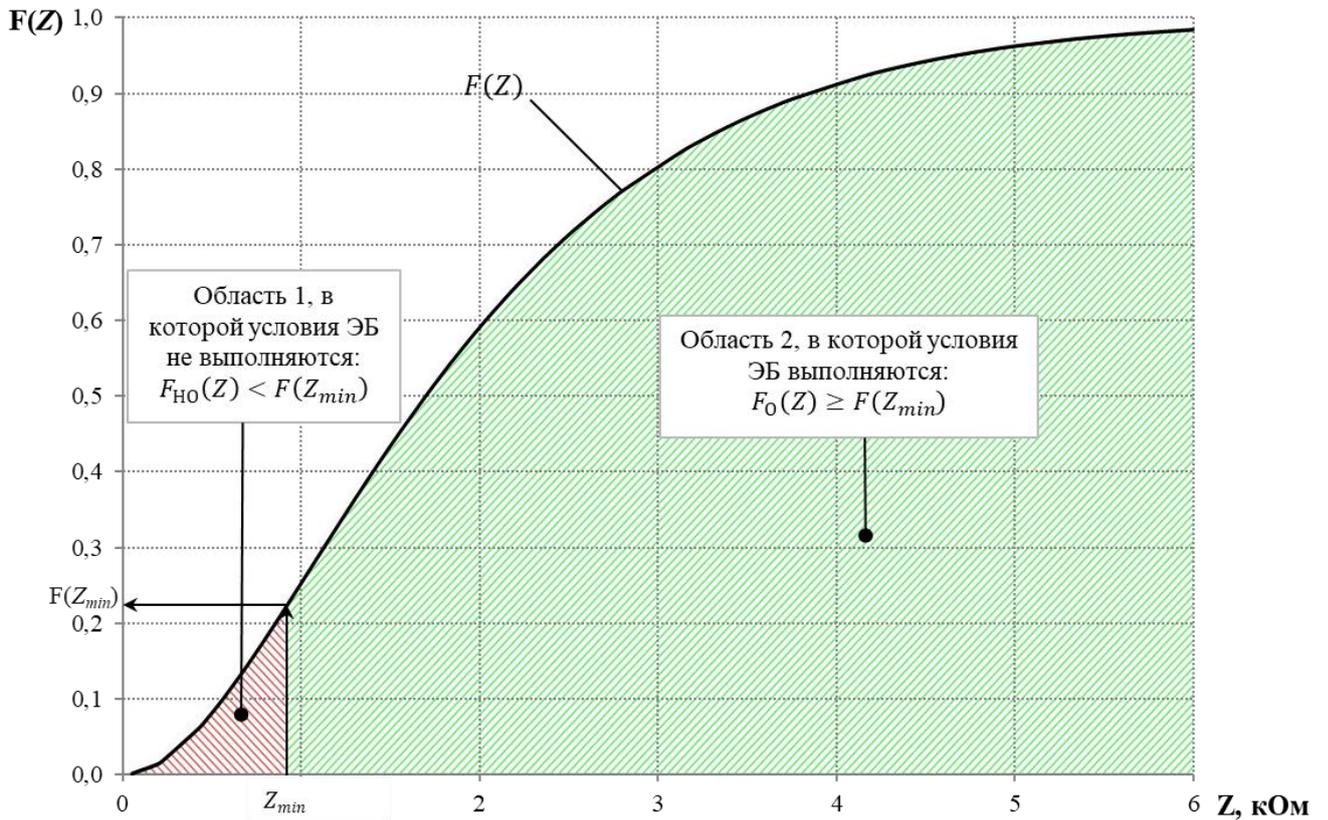


Рисунок 5.2 – Определение условий выполнения условий электробезопасности с использованием функции распределения полного сопротивления изоляции

3. Следует сравнить полученное в п. 2 значение функции $F(Z_{min})$ со значением $F(Z)$, определенным для каждого значения выборки Z :

- если $F(Z) \geq F(Z_{min})$, то алгоритм оценки условий электробезопасности с использованием результатов диссертационной работы (см. рисунок 5.1) завершается и делается вывод, что в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности выполняются.

- если $F(Z) < F(Z_{min})$, то в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности не выполняются, и с целью разработки рекомендаций по их повышению следует перейти к БЛОКу 3.

БЛОК 3 состоит из следующих операций:

Операция 6. Установление зависимости емкостного сопротивления изоляции от активного сопротивления $X = f(R)$.

Зависимость емкостного сопротивления изоляции от активного сопротивления, как показано в настоящей диссертационной работе, представляет собой линейное уравнение вида $X = b_0 + b_1 R$, параметры b_0 и b_1 которого следует определить, используя полученные в Операции 2 выборки активного R и емкостного X сопротивлений, по выражениям

$$b_1 = \frac{\sum_{j=1}^N R_j X_j - \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_j \sum_{j=1}^N X_j}{\sum_{j=1}^N R_j^2 - \frac{1}{N} (\sum_{j=1}^N R_j)^2}; \quad (5.21)$$

$$b_0 = \bar{X} - b_1 \bar{R}, \quad (5.22)$$

где $\bar{R} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N R_j$, $\bar{X} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N X_j$ – средние значения выборок R и X соответственно, кОм.

Операция 7. Определение тока через человека $I_{\text{ч}} = f(U, R_{\text{ч}}, R, f(R))$ с использованием полученной в Операции 6 зависимости и сравнение его с допустимым по условиям электробезопасности значением $I_{\text{ч доп}}$. При выполнении этой Операции необходимо следовать нижеприведенному алгоритму.

1. Следует построить графическую интерпретацию функции $I_{\text{ч}} = f(U, R_{\text{ч}}, R, f(R))$ с использованием выражения (5.23) и зависимости $X = b_0 + b_1 R$, определенной в Операции 6, (см. рисунок 5.3).

$$I_{\text{ч}} = \frac{U}{R_{\text{ч}} \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{(b_0 + b_1 R)^2}\right)}}, \text{ мА.} \quad (5.23)$$

2. Из графика для значения допустимого тока через человека $I_{\text{ч доп}} = 190$ мА следует определить минимально допустимое значение активного сопротивления изоляции R_{min} , при котором безопасный ток $I_{\text{ч доп}}$ будет обеспечен.

3. Следует определить минимальное значение активного сопротивления изоляции $R_{\text{min}}^{\text{с доп}}$, которое соответствует минимальному значению полного сопротивления изоляции Z_{min} , определенному в Операции 5, а также максимально

допустимой по условиям электробезопасности емкости электрической сети $C_{\text{доп}} = 1 \text{ мкФ}$ (согласно ПБ), по выражению (5.24)

$$R_{\text{min}}^{C_{\text{доп}}} = \frac{Z_{\text{min}} \cdot 10^3}{10^3 - Z_{\text{min}} \cdot \omega \cdot C_{\text{доп}}}, \text{ кОм.} \quad (5.24)$$

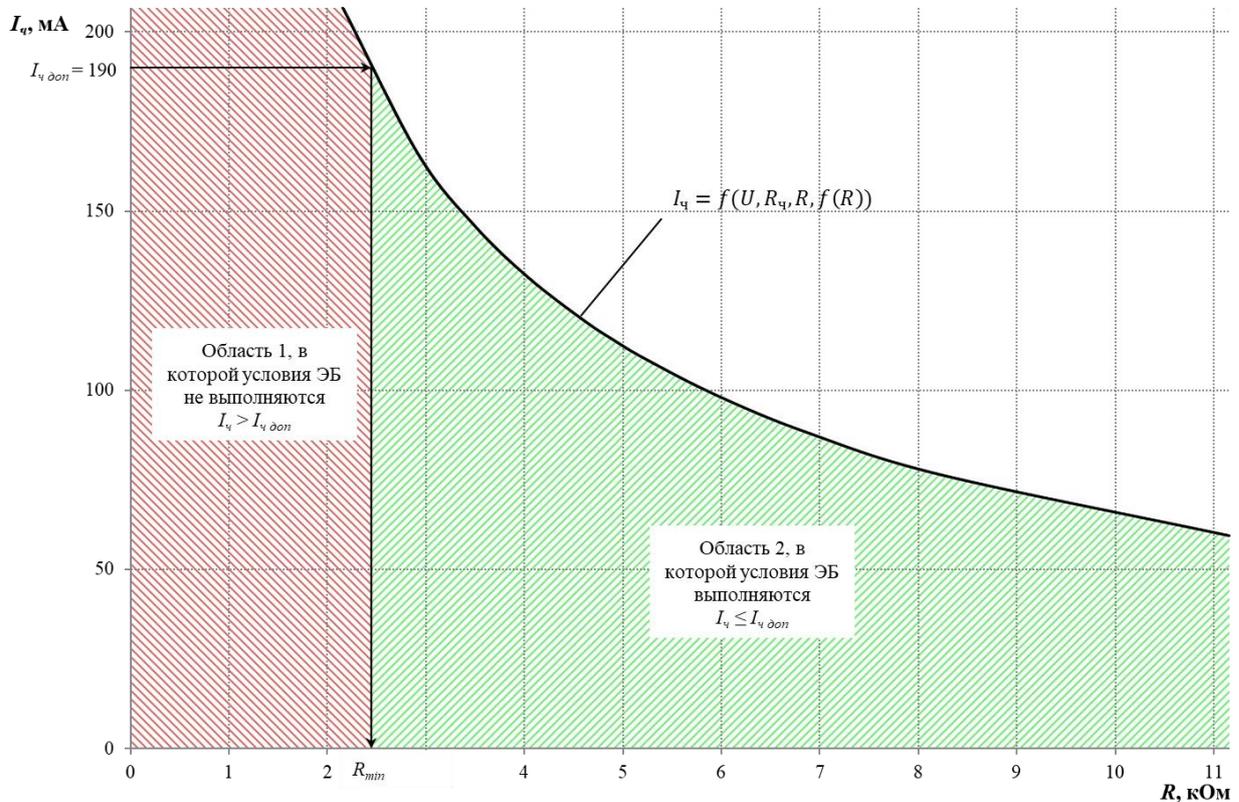


Рисунок 5.3 – Определение областей условий электробезопасности

4. Требуется сравнить значения допустимого по условиям электробезопасности тока и тока, протекающего через человека:

- Если $I_{\text{ч}} \leq I_{\text{ч доп}}$, что следует из $R_{\text{min}}^{C_{\text{доп}}} \geq R_{\text{min}}$, алгоритм оценки условий электробезопасности с использованием результатов диссертационной работы (см. рисунок 5.1) завершается и делается вывод, что в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности выполняются (Область 2 на рисунке 5.3).

- В противном случае $I_{\text{ч}} > I_{\text{ч доп}}$ ($R_{\text{min}}^{C_{\text{доп}}} < R_{\text{min}}$), в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности не выполняются

(Область 1 на рисунке 5.3), и для разработки рекомендаций по их повышению следует перейти к БЛОКУ 4.

БЛОК 4 состоит из *Операции 8*, в соответствии с которой требуется разработать рекомендации по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

В числе рекомендаций по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий используются:

1. Увеличение емкостного сопротивления изоляции электрической сети за счет уменьшения ее емкости путем:

- разукрупнения сети с установкой разделительных трансформаторов;
- приближения питающей участковой подстанции к центру расположения низковольтных электрических нагрузок.

2. Увеличение активного сопротивления изоляции путем замены кабелей в электрической сети на аналогичные, но имеющие более высокое значение активного сопротивления изоляции.

5.2.2. Реализация алгоритма оценки условий электробезопасности в программной среде Microsoft Office Excel

Автоматизация процесса оценки условий электробезопасности в подземных электрических сетях в программной среде Microsoft Office Excel производится в соответствии со следующими действиями.

Операция 1 «Ввод исходных данных» (рисунок 5.4) – здесь в ячейки В4:D33, окрашенные зеленым цветом, необходимо ввести измеренные значения проводимостей изоляции подземных электрических сетей:

- в ячейки В4:В33 – значения полной проводимости изоляции y ;
- в ячейки С4:С33 – значения активной проводимости изоляции g ;
- в ячейки D4:D33 – значения емкостной проводимости изоляции b .

Полученные в результате измерений ряды значений проводимостей изоляции представляют собой вариационные ряды – статистические выборки.

	A	B	C	D
1	Операция 1. Ввод исходных данных			
2		Результаты измерений		
3	№ измерения	Полная проводимость изоляции γ , мСм	Активная проводимость изоляции g , мСм	Емкостная проводимость изоляции b , мСм
4	1	2,17	2,41	1,88
5	2	2,37	2,73	4,57
6	3	0,45	0,35	0,47
7	4	1,88	0,53	0,83
8	5	0,17	0,10	0,16
9	6	1,67	0,48	0,62
10	7	0,14	0,09	0,13
11	8	0,28	0,15	0,24
12	9	0,55	0,39	0,47
13	10	1,31	0,46	0,61
14	11	0,25	0,13	0,23
15	12	0,74	0,45	0,59
16	13	0,34	0,25	0,26
17	14	0,12	0,09	0,12
18	15	0,34	0,21	0,24
19	16	0,17	0,11	0,16
20	17	0,33	0,19	0,24
21	18	0,18	0,12	0,18
22	19	0,38	0,27	0,26
23	20	0,42	0,31	0,41
24	21	0,19	0,12	0,19
25	22	0,73	0,42	0,53
26	23	0,14	0,10	0,15
27	24	0,38	0,30	0,27
28	25	0,07	0,08	0,11
29	26	0,21	0,12	0,20
30	27	0,14	0,10	0,15
31	28	0,17	0,11	0,18
32	29	0,25	0,13	0,21
33	30	0,39	0,30	0,28
34	N= 30			

Рисунок 5.4 – Пример реализации Операции 1

Значения проводимостей изоляции, полученные при отдельном измерении, следует вводить в одну строку таблицы. Предусмотрен ввод значений не более 30-ти измерений. Проведение большего числа измерений для оценки условий электробезопасности в подземных электрических сети не требуется. В случае меньшего количества измерений неиспользуемые ячейки необходимо оставить пустыми.

В ячейке В34 отображается общее количество значений N в каждом из сформированных рядов проводимостей изоляции, соответствующее общему количеству проведенных измерений.

Операция 2 «Вариационные ряды сопротивлений изоляции» (рисунок 5.5) – автоматически происходит формирование вариационных рядов полного Z (ячейки В3:В32), активного R (ячейки С3:С32) и емкостного X (ячейки D3:D32) сопротивлений изоляции, значения которых определяются по выражениям:

- для полного сопротивления – $Z_j = \frac{1}{y_j}$, кОм, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$;
- для активного сопротивления – $R_j = \frac{1}{g_j}$, кОм, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$;
- для емкостного сопротивления – $X_j = \frac{1}{b_j}$, кОм, $j \in \{1, 2, \dots, N\}$.

	А	В	С	Д
1	Операция 2. Вариационные ряды сопротивлений изоляции			
	№ измерения	Полное сопротивление изоляции Z , кОм	Активное сопротивление изоляции R , кОм	Емкостное сопротивление изоляции X , кОм
2				
3	1	0,46	0,42	0,53
4	2	0,42	0,37	0,22
5	3	2,21	2,89	2,15
6	4	0,53	1,88	1,21
7	5	6,04	9,62	6,41
8	6	0,60	2,08	1,62
9	7	7,40	11,44	7,62
10	8	3,54	6,76	4,19
11	9	1,83	2,58	2,14
12	10	0,77	2,18	1,65
13	11	3,95	7,89	4,43
14	12	1,35	2,22	1,69
15	13	2,92	4,03	3,87
16	14	8,33	11,49	8,23
17	15	2,96	4,82	4,09
18	16	5,88	9,48	6,28
19	17	3,03	5,27	4,16
20	18	5,69	8,48	5,45
21	19	2,62	3,67	3,82
22	20	2,38	3,22	2,44
23	21	5,13	8,46	5,39
24	22	1,37	2,40	1,87
25	23	7,11	9,84	6,88
26	24	2,62	3,37	3,71
27	25	13,81	12,09	9,12
28	26	4,79	8,44	4,92
29	27	7,07	9,74	6,69
30	28	5,77	8,72	5,67
31	29	4,06	7,97	4,75
32	30	2,58	3,30	3,62
33	N= 30			

Рисунок 5.5 – Пример реализации Операции 2

В ячейке В33 отображается число значений в каждом вариационном ряду сопротивлений изоляции, которое равно числу значений каждого вариационного ряда проводимостей изоляции сети.

Операция 3 «Статистические характеристики полного сопротивления изоляции Z » (рисунок 5.6) – автоматически формируется интервальный вариационный ряд полного сопротивления изоляции Z с использованием выражений 5.1-5.2 и определяются его параметры. В ячейке G18 отображается средневзвешенное значение ряда, вычисленное по выражению 5.5, а в ячейке H18 – дисперсия ряда, определенная по выражению 5.6. Определенные параметры используются для дальнейшей оценки условий электробезопасности по критерию полного сопротивления изоляции.

Операция 4 «Установление вероятностного закона распределения полного сопротивления изоляции $F(Z)$ » (рисунок 5.7) – автоматически определяется закон распределения вариационного ряда полного сопротивления изоляции (в исследованиях диссертации указанные законы распределения хорошо согласовываются с логнормальным или гамма-законом).

В этом случае параметры логнормального закона μ и σ^2 , вычисленные по выражению 5.9, представлены в ячейках В4 и В5 соответственно, а параметры гамма-закона α и β , вычисленные по выражению 5.10, представлены в ячейках В7 и В8 соответственно.

Проверка соответствия распределения полного сопротивления изоляции заданному закону распределения (логнормальному или гамма) осуществляется с применения критерия согласия Пирсона. Наблюдаемое значения критерия согласия Пирсона для логнормального закона $\chi_{\text{набл Л}}^2$, вычисленное с использованием выражения 5.15, представлено в ячейке D21. Наблюдаемое значения критерия согласия Пирсона для гамма-закона $\chi_{\text{набл Г}}^2$, вычисленное с использованием выражения 5.16, представлено в ячейке G21. Критическое значение критерия согласия Пирсона $\chi_{5\%,k}^2$ в зависимости от числа степеней свободы k (ячейка С23) представлено в ячейке С24.

	A	B	C	D	E	F	G	H
1	Операция 3. Статистические характеристики полного сопротивления изоляции Z							
2	Число интервалов $n = 6$							
3	Длина интервала h (кОм) = 2,24							
4								
5	Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции Z							
6	Интервалы полного сопротивления изоляции i	Минимальное значение интервала $Z_{min i}$, кОм	Максимальное значение интервала $Z_{max i}$, кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Количество вариант в интервале N_i	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
7								
8	1	0,42	2,66	1,54	13	0,43	0,66	2,33
9	2	2,66	4,90	3,78	7	0,23	0,87	3,29
10	3	4,90	7,14	6,02	7	0,23	1,38	8,34
11	4	7,14	9,38	8,26	2	0,07	0,58	4,78
12	5	9,38	11,62	10,5	0	0	0	0
13	6	11,62	13,86	12,74	1	0,03	0,38	4,87
14	-	-	-	-	-	-	-	-
15	-	-	-	-	-	-	-	-
16	-	-	-	-	-	-	-	-
17	-	-	-	-	-	-	-	-
18	-	-	-	-	$N = 30$	$\sum_{i=1}^n P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 3,87$	$\sigma_Z^2 = 23,61$

Рисунок 5.6 – Пример реализации Операции 3

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	Операция 4. Установление вероятностного закона распределения полного сопротивления изоляции $F(Z)$									
2										
3	Параметры логнормального закона									
4	$\mu = 0,88$									
5	$\sigma^2 = 0,95$									
6	Параметры гамма-распределения									
7	$\alpha = 0,63$									
8	$\beta = 6,1$									
9	Критические значения критерия согласия Пирсона $\chi^2_{5\%,k}$									
10	Интервалы полного сопротивления изоляции	$f_L(Z_i)$	P_{iL}	$\frac{(N_i - N \cdot P_{iL})^2}{N \cdot P_{iL}}$	$f_\Gamma(Z_i)$	$P_{i\Gamma}$	$\frac{(N_i - N \cdot P_{i\Gamma})^2}{N \cdot P_{i\Gamma}}$	Число степеней свободы k	Значение критерия $\chi^2_{5\%,k}$	
11	1	0,24	0,57	0,98	0,15	0,47	0,09	1	3,8	
12	2	0,1	0,24	0,01	0,07	0,22	0,02	2	6	
13	3	0,04	0,1	5,33	0,04	0,13	2,46	3	7,8	
14	4	0,02	0,05	0,17	0,03	0,09	0,18	4	9,5	
15	5	0	0,02	0,6	0,02	0,06	1,8	5	11,1	
16	6	0,01	0,02	0,27	0,01	0,03	0,01	6	12,6	
17	-	-	-	-	-	-	-	7	14,1	
18	-	-	-	-	-	-	-			
19	-	-	-	-	-	-	-			
20	-	-	-	-	-	-	-			
21	-	$\sum_{i=1}^n f_L(Z_i) = 0,42$	-	$\chi^2_{набл L} = 7,4$	$\sum_{i=1}^n f_\Gamma(Z_i) = 0,32$	-	$\chi^2_{набл \Gamma} = 4,6$			
22										
23	Число степеней свободы $k = 3$									
24	Значение критерия $\chi^2_{5\%,k} = 7,8$									
25										
26	Неравенство	Выполнение неравенства	Вид закона распределения $F(Z)$							
27	$\begin{cases} \chi^2_{набл L} \leq \chi^2_{5\%,k}; \\ \chi^2_{набл \Gamma} \leq \chi^2_{5\%,k}. \end{cases}$	выполняется	гамма							
28	$\begin{cases} \chi^2_{набл L} \leq \chi^2_{5\%,k}; \\ \chi^2_{набл \Gamma} > \chi^2_{5\%,k}. \end{cases}$	не выполняется	-							
29	$\begin{cases} \chi^2_{набл L} > \chi^2_{5\%,k}; \\ \chi^2_{набл \Gamma} \leq \chi^2_{5\%,k}. \end{cases}$	не выполняется	-							
30										
31										

Рисунок 5.7 – Пример реализации Операции 4

Системы неравенств 5.17-5.19, которые используются для выбора закона распределения путем сравнения наблюдаемых и критических значений критерия согласия Пирсона, представлены в ячейках A27:A29. При выполнении одной из систем неравенств в соответствующих по строке ячейках столбцов В и С отображаются надписи «выполняется» и вид закона распределения («гамма» или «логнормальный»), для других систем неравенств – «не выполняется» и «-» (см. п. 6 Операции 4 – стр. 140). В случае невыполнения всех трех систем неравенств в ячейке A31 появляется надпись «Следует выбрать другой закон распределения», в соответствии с которой требуется выбрать иной закон распределения вероятностей.

Операция 5 «Обеспечение условий электробезопасности по критерию полного сопротивления изоляции» (рисунок 5.8) – автоматически определяются области обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях.

Для этого ряд полного сопротивления изоляции трансформируется в упорядоченный ряд в порядке возрастания значений (ячейки E4:E33), и для каждого значения полного сопротивления изоляции с использованием выбранного в Операции 4 закона распределения определяется соответствующая вероятность $F(Z)$ (ячейки F4:F33).

С использованием выражения 5.20 определяется минимальное по условиям электробезопасности значение полного сопротивления изоляции сети Z_{min} , которое соответствует: фазному напряжению сети, значение которого необходимо ввести в ячейку B3); сопротивлению тела человека (ячейка B4); допустимому значению тока через человека (ячейка B8). Значение Z_{min} отражается в ячейке B11.

В ячейке F35 для минимального значения полного сопротивления изоляции Z_{min} определяется значение вероятности $F(Z_{min})$ с использованием выбранного в Операции 4 закона распределения.

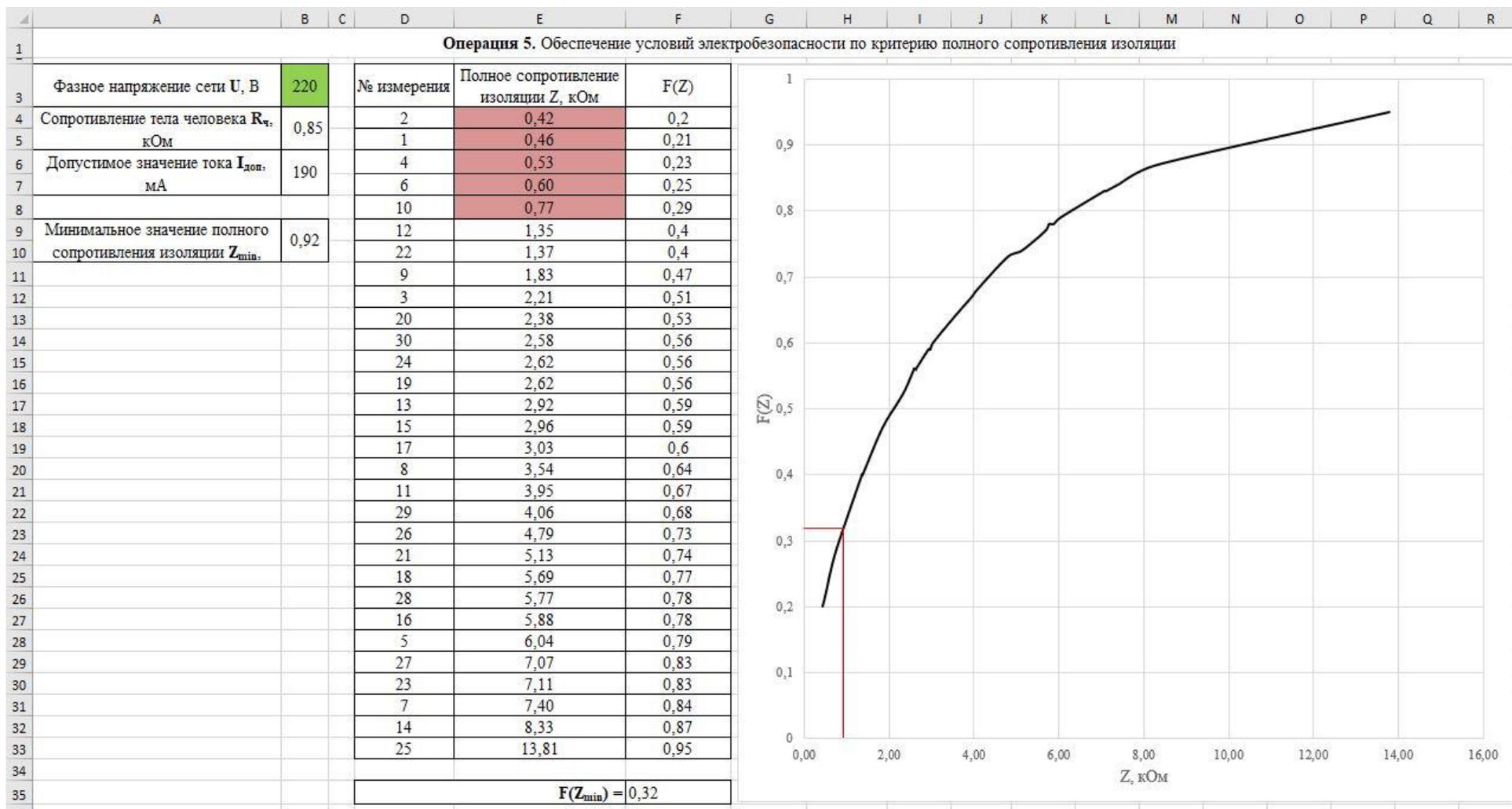


Рисунок 5.8 – Пример реализации Операции 5

По данным ячеек E4:F33 строится закон распределения вероятности $F(Z)$. Значение $F(Z_{min})$ делит зависимость $F(Z)$ на две области, по которым принимается решение:

- если $F(Z) \geq F(Z_{min})$, то в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности выполняются.
- если $F(Z) < F(Z_{min})$, то в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности не выполняются, и значения полного сопротивления изоляции (ячейки E4:E33), соответствующие этому условию, окрашиваются в красный цвет (см. рисунок 5.8).

Операция 6 «Установление зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления $X=f(R)$ » (рисунок 5.9) – автоматически с использованием выражений 5.21-5.22 определяются параметры зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей b_1 и b_0 , отраженные в ячейках B3:B4. Общий вид зависимости представлен в ячейках D4:I4.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
1	Операция 6. Установление зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления $X=f(R)$								
2									
3		$b_1 = 0,17$				Зависимость			
4		$b_0 = 3,17$		$X =$	3,17	+	0,17	R	

Рисунок 5.9 – Пример реализации Операции 6

Операция 7 «Обеспечение условий электробезопасности по критерию тока через человека» (рисунок 5.10) – автоматически определяются области обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях по критерию тока через человека.

Для этого ряд активного сопротивления изоляции трансформируется в упорядоченный ряд по возрастанию значений (ячейки B3:B32), и для каждого значения ряда с использованием выражения 5.23 и зависимости $X=f(R)$, полученной

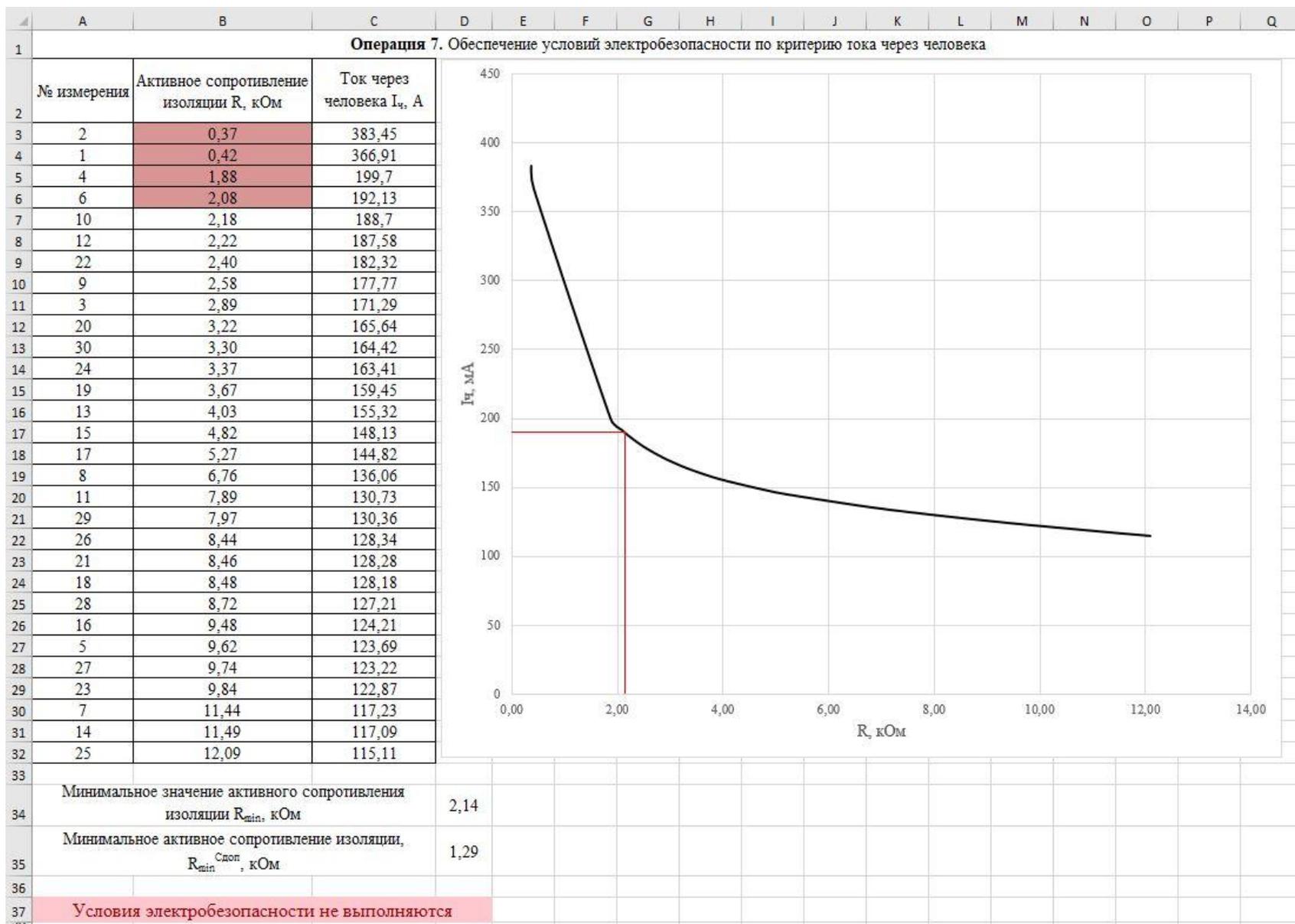


Рисунок 5.10 – Пример реализации Операции 7

в Операции 6, определяются значения тока через человека (ячейки С3:С32). По значениям ячеек В3:С32 строится зависимость $I_{ч} = f(U, R_{ч}, R, f(R))$ и определяется минимальное значение активного сопротивления изоляции R_{min} , при котором безопасный ток $I_{ч доп} = 190$ мА будет обеспечен (ячейка D34).

Определяется минимальное значение активного сопротивления изоляции $R_{min}^{C_{доп}}$, которое соответствует минимальному значению полного сопротивления изоляции Z_{min} , определенному в Операции 5, а также максимально допустимой по условиям электробезопасности емкости электрической сети $C_{доп} = 1$ мкФ (согласно ПБ), по выражению 5.24. Значение $R_{min}^{C_{доп}}$ представлено в ячейке D35.

Сравниваются значения допустимого по условиям электробезопасности тока и тока, протекающего через человека:

- Если $I_{ч} \leq I_{ч доп}$, что выполняется при $R_{min}^{C_{доп}} \geq R_{min}$, то в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности выполняются, и в ячейке А36 отображается надпись «Условия электробезопасности выполняются».

- Если $I_{ч} > I_{ч доп}$ ($R_{min}^{C_{доп}} < R_{min}$), в подземных электрических сетях исследуемого предприятия условия электробезопасности не выполняются. В ячейке А36 отображается надпись «Условия электробезопасности не выполняются» и значения активного сопротивления (ячейки В3:В32), соответствующие этому условию, окрашиваются в красный цвет (см. рисунок 5.10). Следовательно, для указанных выше участков необходимо повысить условия электробезопасности путем применения рекомендаций, изложенных в Операции 8.

5.4. Выводы

По результатам исследований, выполненных в диссертационной работе, разработаны:

1. Алгоритм оценки условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, позволяющий выполнять оценку условий электробезопасности с учетом вероятностных свойств параметров изоляции подземных электрических сетей. Кроме оценки в случае необеспечения условий электробезопасности алгоритм предлагает рекомендации для повышения уровня электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

2. Программная реализация алгоритма оценки условий электробезопасности, которая позволяет автоматизировать выполнение оценки условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, и определить, в каких сетях условия электробезопасности выполняются, а в каких требуется применение разработанных рекомендаций для повышения уровня электробезопасности.

Разработанные рекомендации позволяют оценивать условия электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий и предлагают мероприятия для повышения условий электробезопасности.

Заключение

В диссертационной работе дано решение актуальной научной задачи – обоснование условий и разработка рекомендаций по повышению уровня электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

Основные научные и практические результаты работы:

1. Выполнен анализ производственного травматизма за период с 2004 г. по 2016 г. на горнодобывающих предприятиях угольной, горнорудной и нерудной отраслей, который позволил: выявить динамику электротравматизма со смертельным исходом; причины, приводящие к поражению электрическим током; установить, что в подземных выработках угольных шахт и рудников наибольший удельный вес электропоражений приходится на случаи прикосновения к токоведущим частям электроустановок.

2. Разработана методика исследования параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий, как случайных величин, с помощью которой проведены исследования активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости сети относительно земли подземных электрических сетей предприятий угольной (предприятия Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, а также Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов) и горнорудной (предприятия Норильского региона и Восточной Сибири, а также комбинат «Апатит») отраслей. При этом:

- получены статистические оценки и законы распределения вероятностей параметров изоляции и емкости сети относительно земли подземных электрических сетей угольных шахт и рудников, соответствующие логнормальному и гамма-закону;

- установлены зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей, которые описываются с высокой статистической значимостью и математической точностью аппроксимации линейной функцией.

3. Разработана методика и выполнено исследование условий обеспечения электробезопасности подземных электрических сетей горных предприятий с учетом вероятностного характера параметров изоляции сетей. При этом:

- получено выражение тока через человека при прикосновении к токоведущим частям с учетом установленной зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей;

- получены устойчивые предельные минимальные значения полного и активного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников с учетом их вероятностного характера, при которых обеспечиваются условия электробезопасности.

4. На основании выполненных исследований разработаны рекомендации по оценке условий и обеспечению допустимого уровня электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, в виде:

- комплексной рекомендации, представляющей собой реализованный в программной среде Microsoft Office Excel алгоритм оценки условий электробезопасности, заключающийся в использовании вероятностных свойств параметров изоляции подземных электрических сетей для оценки условий электробезопасности;

- практических рекомендаций для повышения уровня электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, касающихся технических аспектов повышения уровня электробезопасности.

Список литературы

1. А.с. СССР 1406522 МКИ G01R 27/18. Устройство для контроля активных параметров фазной изоляции эл. сети с изолированной нейтралью и устройство для его осуществления. / А.Г. Машкин, Ю.Г. Бацежев, В.Ф. Кузин. Оpubл. бюл. №24, 1988.
2. А.с. СССР 1822985 МКИ G01R 27/18. Способ определения параметров изоляции сети с изолированной нейтралью относительно земли/ Бацежев Ю.Г., Дудченко О.Л., Петуров В.Н. Оpubл. бюл. № 23, от 23.06.93.
3. А. с. СССР 1653060 МКИ H02H 3/17. Устройство для контроля сопротивления изоляции и защитного отключения в сетях с изолированной нейтралью/ Ю. Г. Бацежев, Г. Ф. Горбачев, В. И. Петуров. - Оpubл. 30.05.91, бюл. №20. - 4 с.
4. А. с. СССР 1780044 МКИ G01R 27/18. Способ определения параметров изоляции фаз сети с изолированной нейтралью/ В. И. Петуров, Ю. Г. Бацежев, С. Г. Лаевский. - Оpubл. 07.12.92, бюл. №45. - 4 с.
5. Амургалинов С. Т. Разработка методов и средств по техническому обеспечению электробезопасности в коротких сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. - Челябинск, 2010.
6. Бабичев Ю. Е., Цапенко Е. Ф. Определение токов утечки отдельных фаз в шахтных сетях с изолированной нейтралью // В сб. научн. тр. XI Междунар. конф. "Электробезопасность". - Вроцлав. Польша. - 1997. - С. 433-438.
7. Бацежев Ю. Г. Обоснование системы и разработка средств электробезопасности на горных предприятиях: дис. ... докт. техн. наук. - М., 1986.
8. Белюстин О. Н. Исследование условий эксплуатации и совершенствование аппаратов защиты от утечек тока на землю в сетях с изолированной нейтралью напряжением до 1000 В: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. - М., 1981. - 20 с.
9. Библия электрика: ПУЭ, МПОТ, ПТЭ. - М.: Эксмо, 2012. - 752 с.

10. Большев Л. Н., Смирнов Н. В. Таблицы математической статистики. - М.: Наука, 1983. - 416 с.
11. Буралков А. А., Щуцкий В. И. О вероятностной оценке уровня электробезопасности // Электричество. - 1982. - №2. - С. 16-20.
12. Бургсдорф В. В., Якобс А. И. Заземляющие устройства электроустановок. - М.: Энергоатомиздат, 1987. - 400 с.
13. Введение в эконометрику / Яновский Л. П., Буховец А. Г., под ред. Яновского Л. П. - 2-е изд. - М.: КНОРУС, 2007. - 256 с.
14. Гладилин Л. В. Исследование условий безопасности рудничных сетей с изолированной нейтралью: автореф. дис. ... докт. техн. наук. - Л., 1954. - 20 с.
15. Глухарев Ю. Д. Исследование состояния изоляции подземных электроустановок напряжением до 1000 В рудников цветной металлургии северных районов: дис. ... канд. техн. наук. - М., 1973. - 140 с.
16. Гмурман В. Е. Теория вероятностей и математическая статистика. - 5-е изд. - М.: "Высш. школа", 1977. - 479 с.
17. Годовой отчет о деятельности Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору (ежегодн. изд., 2004-2016 г.) // Gosnadzor.ru: сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору URL: http://www.gosnadzor.ru/public/annual_reports/ (дата обращения: 14.04.2018).
18. Гордон Г. Ю. Расследование и анализ производственного электротравматизма. Методические указания и рекомендации. - Л.: ВНИИ охраны труда ВЦСПС, 1980. - 44 с.
19. Гордон Г. Ю., Вайнштейн Л. И. Электротравматизм и его предупреждение. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 256 с.
20. Гордон Г. Ю., Филипов В. И., Яроченко В. А. Электротравматизм на производстве. - Л.: Лениздат, 1973. - 213 с.
21. ГОСТ 12.1.038-82 Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изменением N 1). - Введ. 1983-07-01 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.

22. ГОСТ 12.4.155-85 Устройства защитного отключения. Классификация. Общие технические требования. - Введ. 1986-01-01 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2003.

23. ГОСТ 31612-2012 Устройства защиты от токов утечки рудничные для сетей напряжением до 1200 В. Общие технические требования - Введ. 2013-02-15 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2012.

24. ГОСТ Р 12.1.009-2009 Электробезопасность. Термины и определения. - Введ. 2011-01-01 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2009.

25. ГОСТ Р 12.1.019-2009 Электробезопасность. Общие требования и номенклатура видов защиты. - Введ. 2011-01-01 - М.: ИПК Издательство стандартов, 2009.

26. Дзюбан В. С. Аппараты защиты от токов утечки в шахтных электрических сетях. - М.: Недра, 1982. - 150 с.

27. Зыкина Е. В. Об изменении первичных критериев электробезопасности при сочетанном воздействии физических факторов различной природы // Электробезопасность. - 2016. - №3. - С. 44-46.

28. Изоляция подземных электроустановок шахт и электробезопасность / Гладилин Л. В., Меньшов Б. Г., Щуцкий В. И., Антонов Ю. П., Бородин Н. И., - М.: Недра, 1966. - 264 с.

29. Калинин В. В., Айдаров Ф. А. Состояние изоляции сетей электроснабжения напряжением 6 кВ шахт центрального Донбасса // Взрывозащищенное электрооборудование. - 2010. - №1. - С. 268-276.

30. Карякин Р. Н. Нормативные основы устройства электроустановок. - М.: Энергосервис, 1998. - 240 с.

31. Кацай В. В. Влияние шума электрооборудования на электротехнические характеристики тела человека: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. - Челябинск, 2007. - 109 с.

32. Колосюк В. П. Защитное отключение рудничных электроустановок. - М.: Недра, 1980. - 334 с.

33. Колосюк В. П. Техника безопасности при эксплуатации рудничных электроустановок. - М.: Недра, 1987. - 407 с.

34. Коростелев М. Е. Исследование электробезопасности в условиях подземных и открытых горных разработок: дис. ... канд. техн. наук. - М., 1971. - 203 с.

35. Курбатова О. А. Анализ электротравматизма и разработка мероприятий по улучшению условий электробезопасности на горных предприятиях: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. - М., 1988. - 17 с.

36. Ликаренко А. Г. Исследование и совершенствование средств защитного отключения электрических сетей напряжением до 1000 В шахт и карьеров: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. - М., 1976. - 16 с.

37. Ляхомский А. В. Исследование условий и разработка мероприятий по обеспечению электробезопасности в контактных сетях электровозной откатки угольных шахт: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.09.03. - М., 1977. - 15 с.

38. Ляхомский А. В., Курбатова О. А. Метод комплексной оценки электробезопасности на горных предприятиях // Экология и безопасность труда в радиоэлектронике. - М.: МИРЭА, 1986. - С. 94-99.

39. Ляхомский А. В., Синчук О. Н., Харитонов А. А., Мельник О. В. Идентификация причинно-следственных связей и травм от электрического тока на железорудных производствах // Электротехнические и компьютерные системы. - 2013. - №12. - С. 44-54.

40. Манойлов В. Е. Основы электробезопасности. - 5-е изд. - Л.: Энергоатомиздат, 1991. - 480 с.

41. Машкин А. Г. Разработка способов и средств обеспечения электробезопасности в рудничных электрических сетях напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук. - М., 1987.

42. Меньшов Б. Г. Исследование вопросов безопасного применения электроэнергии в подземных горных разработках: дис. ... канд. техн. наук. - М., 1958. - 203 с.

43. "Методические указания по электроснабжению, выбору и проверке электрических аппаратов, кабелей и устройств релейной защиты в участковых сетях угольных шахт (рудников) напряжением 3300 В от 28 июня 2011 г. № 325 // официальный сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору: www.gosnadzor.ru. 2011 г."

44. Михайлов Г. А., Войтишек А. В. Численное статистическое моделирование: Методы Монте-Карло. - М.: Академия, 2006. - 370 с.

45. Нагорных В. В. Система непрерывного контроля сопротивлений изоляции отдельных фаз электрической сети с изолированной нейтралью // Горное оборудование и электромеханика. - 2010. - №2. - С. 16-23.

46. Нагорных В. В., Бабичев Ю. Е. Непрерывный контроль сопротивлений изоляции отдельных фаз низковольтных электрических сетей с изолированной нейтралью // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. - 2010. - №3. - С. 59-64.

47. Новиков А. И. Эконометрика. - 2-е изд. - М.: 2007. - 144 с.

48. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения / Сидоров А. И., Петуров В. И., Пичуев А. В., Суворов И. Ф., - Чита: ЧитГУ, 2009. - 268 с.

49. Пат. РФ № 2 136 011 МПК G01R 31/02. Способ определения активной и емкостной составляющих сопротивления изоляции фаз сети относительно земли/ "Челябинский государственный технический университет". Бюл. №34 от 10.12.06.

50. Петров Г. М. Контроль параметров изоляции электрических сетей промышленных предприятий с тяжелыми условиями эксплуатации // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). - 2004. - №4. - С. 270-271.

51. Петров Г. М. Электрификация объектов при строительстве городских подземных сооружений. - М.: Изд-во "Горная книга", изд-во МГГУ, 2011. - 522 с.

52. Петуров В. И. Исследование и разработка способов и средств контроля параметров изоляции рудничных электрических сетей: дис. ... канд. техн. наук. - М., 1992.

53. Петуров В. И. Классификация способов определения параметров сопротивления изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью // *Электробезопасность*. - 2008. - №1. - С. 20-24.

54. Петуров В. И. Способ измерения параметров изоляции фаз в сетях с изолированной нейтралью // *Электробезопасность*. - 1998. - №1. - С. 9-12.

55. Петуров В. И. Устройство контроля сопротивления изоляции и защитного отключения в сетях с изолированной нейтралью // *Электробезопасность*. - 2010. - №2-3. - С. 25-31.

56. Петуров В. И., Чуйко А. Д. Классификационный анализ способов определения параметров сопротивления изоляции в электрических сетях с изолированной нейтралью // *Транспортная инфраструктура Сибирского региона*. - 2017. - Т. 1. - С. 736-740.

57. Пичуев А. В. Методологические аспекты системного анализа электробезопасности на горных предприятиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал)*. - 2011. - №5. - С. 352-355.

58. Пичуев А. В. Опасность электропоражения при несимметрии параметров изоляции рудничной участковой электрической сети // *Электробезопасность*. - 2011. - №3. - С. 32-41.

59. Пичуев А. В. Параметрические зависимости сопротивления изоляции рудничных участковых электрических сетей // *Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал)*. - 2011. - №4. - С. 398-400.

60. Пичуев А. В. Параметры изоляции электрической сети с учетом активного и емкостного сопротивлений току абсорбции // *Электробезопасность*. - 2011. - №4. - С. 22-28.

61. Пичуев А. В. Системный анализ электробезопасности на горных предприятиях // *Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал)*. - 2011. - №4. - С. 319-321.

62. Пичуев А. В. Системный подход в решении проблемы электробезопасности на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). - 2011. - №4. - С. 370-372.

63. Пичуев А. В., Ляхомский А. В. Принципы системного подхода к анализу электробезопасности на горных предприятиях // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). - 2016. - №3. - С. 85-92.

64. Пичуев А. В., Петуров В. И. Анализ причин электротравматизма на горных предприятиях // Энергетика: эффективность, надежность, безопасность. Материалы трудов XXI Всероссийской научно-технической конференции. В 2 томах. - Томск: ТПУ, 2015. - С. 198-200.

65. Пичуев А. В., Петуров В. И. Компенсация емкостных токов утечки в рудничных участковых электрических сетях // V Всероссийская научно-техническая конференция "Электроэнергия: от получения и распределения до эффективного использования". - Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2012. - С. 142-143.

66. Пичуев А. В., Петуров В. И. Принципы создания устройств контроля и защиты в рудничных высоковольтных сетях // Интенсификация горнорудного производства: тезисы докладов IV Всесоюзной конференции. - Свердловск: ИГД МЧМ СССР, 1989. - С. 68-69.

67. Пичуев А. В., Петуров В. И., Суворов И. Ф. Влияние нестационарных режимов на электробезопасность при эксплуатации электрооборудования горных предприятий. - М.: изд-во "Горная книга", 2011. - 326 с.

68. Романцов Д. С. Электротравматизм на производстве: причины и следствия // Промышленная энергетика. - 1992. - №11. - С. 67-69.

69. Рубан Ю. С. Разработка методики количественной оценки электробезопасности с учетом функционального состояния оператора: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01. - Харьков, 1996.

70. Рыжов П. А. Математическая статистика в горном деле. - М.: "Высш. школа", 1973. - 287 с.

71. Сапунков М. Л. Способ контроля сопротивления изоляции в рудничных электрических сетях 6...10 кВ по рабочим напряжением // Горное оборудование и электромеханика. - 2014. - №12. - С. 3-7.

72. Сидоров А. И., Саидалиев Ш. С., Табаров Н. Х. Методы исследования условий электробезопасности // Электробезопасность. - 2016. - №2. - С. 51-57.

73. Сидоров А. И., Тряпицын А. Б., Зыкина Е. В., Елисеева Т. Л. Первичные критерии электробезопасности при совместном действии электрического тока и шума // Известия высших учебных заведений. Горный журнал. - 2013. - №1. - С. 22-25.

74. Синчук О. Н., Толмачов С. Т., Харитонов А. А., Омельченко А. В. К вопросу оценки первичных критериев электробезопасности при эксплуатации тяговых контактных сетей железорудных шахт // Вісник Кременчуцького Національного університету імені Михайла Остроградського. - 2013. - №5. - С. 48-53.

75. Система учета и анализа электротравматизма / Щуцкий В. И., Маврицын А. М., Ситчихин Ю. В., Сидоров А. И., Щергин С. Т., - М.: ЦНИЭИуголь, 1977. - 17 с.

76. Смирнов Н. В., Дунин-Барковский И. В. Курс теории вероятностей и математической статистики для технических приложений. - М.: Наука, 1969. - 512 с.

77. Соболев В. Г. Разработка научных основ прогнозирования электробезопасности в угольных шахтах: автореф. дис. ... докт. техн. наук: 05.26.01. - М., 1988. - 31 с.

78. Статистические методы в инженерных исследованиях / Бородюк В. П., Вошинин А. П., Иванов А. З. и др.; под ред. Г. К. Круга. - М.: Высш. школа, 1983. - 216 с.

79. Суворов И. Ф. Комплексные системы обеспечения условий электробезопасности при эксплуатации электроустановок до 1000 В. - Чита: ЧитГУ, 2005. - 328 с.

80. Суворов И. Ф. Моделирование возникновения электроопасной ситуации в системах электроснабжения с изолированной нейтралью на основе логико-вероятностного метода // *Электробезопасность*. - 2005. - №2. - С. 3-13.

81. Суворов И. Ф. Развитие теории, разработка методов и средств обеспечения электробезопасности в системах электроснабжения напряжением до 1000 В: дис. ... докт. техн. наук: 05.26.01. - Чита, 2006. - 457 с.

82. Тряпицын А. Б., Абдуллоев И. Т., Сидоров А. И. Анализ возможностей снижения производственного травматизма в угольной отрасли Российской Федерации // *Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело*. - 2017. - Т. 16, №4. - С. 391-400.

83. Тряпицын А. Б., Сидоров А. И. Анализ электротравматизма в угольной отрасли Российской Федерации с 2000 по 2010 годы // *Всероссийская ежегодная научно-техническая конференция «Общество, наука, инновации» (НТК-2012)*. - Киров: Вятский государственный университет, 2012. - С. 1950-1952.

84. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Инструкция по электроснабжению, выбору и проверке электрических аппаратов, кабелей и устройств релейной защиты в участковых сетях угольных шахт напряжением до 1200 В" от 6 ноября 2012 г. № 627 // официальный сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору: www.gosnadzor.ru. 2012 г.

85. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности в угольных шахтах" от 19 ноября 2013 г. № 550 // официальный сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору: www.gosnadzor.ru. 2014 г.

86. Федеральные нормы и правила в области промышленной безопасности "Правила безопасности при ведении горных работ и переработке твердых полезных ископаемых" от 11 декабря 2013 г. № 599 // официальный сайт Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору: www.gosnadzor.ru. 2014 г.

87. Федеральный закон от 21.07.1997 N 116-ФЗ "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" (ред. от 02.07.2013).

88. Цапенко Е. Ф. Контроль изоляции в сетях до 1000 В. - 2-е изд. - М.: Энергия, 1972.

89. Цапенко Е. Ф., Случевский Ю. Н. Использование вольтметра для определения параметров изоляции фаз в сети с изолированной нейтралью до 1000 В // Измерительная техника. - 1983. - №2.

90. Цапенко Е. Ф., Шкундин С. З. Электробезопасность на горных предприятиях. - 2-е изд. - М.: изд-во МГГУ, 2008.

91. Чепайкина Т. А. Снижение электротравматизма на угольных предприятиях в условиях вечной мерзлоты: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.03. - Нерюнгри, 2005. - 154 с.

92. Черников А. А. Компенсация емкостных токов в сетях с изолированной нейтралью. - М.: Энергия, 1974. - 96 с.

93. Шкрабец Ф. П., Вареник Е. А. Контроль параметров изоляции в распределительных сетях без снятия рабочего напряжения // Горный информационно-аналитический бюллетень (Научно-технический журнал). - 2009. - Т. 8, №12. - С. 93-105.

94. Щуцкий В. И. Исследование некоторых аспектов проблемы электробезопасности в горной промышленности СССР: дис. ... докт. техн. наук. - М., 1970. - 433 с.

95. Щуцкий В. И., Бацезев Ю. Г., Глухарев Ю. Д., Ляхомский А. В., Ким К. Е. Исследование условий электробезопасности при эксплуатации подземного электрооборудования шахт и рудников // Тезисы докладов 4-й Всесоюзной научно-технической конференции "Современное взрывозащищенное электрооборудование". - М.: Информэлектро, 1975. - С. 78-80.

96. Щуцкий В. И., Белюстин О. Н., Буралков А. А. Защитное отключение электроустановок потребителей. - М.: Энергоатомиздат, 1994. - 272 с.

97. Щуцкий В. И., Волощенко Н. И., Плащанский Л. А. Электрификация подземных горных работ. - М.: Недра, 1986. - 364 с.

98. Щуцкий В. И., Забиров А. Устройства защиты и сигнализации от замыканий на землю в шахтных электросистемах напряжением до 1000 В. - М.: ВНИИЭМ, 1966. - 117 с.

99. Щуцкий В. И., Израитель С. А., Ляхомский А. В. Электротравматизм на горнодобывающих предприятиях цветной металлургии // Безопасность труда в промышленности. - 1978. - №8. - С. 54-57.

100. Щуцкий В. И., Коренев Н. П. Влияние частоты электрического тока на условия электробезопасности // Электробезопасность на горнорудных предприятиях: сб. материалов респ. науч.-техн. конф. - Днепропетровск, - 1974. - С. 55-59.

101. Щуцкий В. И., Костарев А. П., Ляхомский А. В. Электротравматизм на угольных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. - 1978. - №2. - С. 47-50.

102. Щуцкий В. И., Ляхомский А. В., Израитель С. А. Электротравматизм и пути его снижения на горнодобывающих предприятиях черной металлургии // Горный журнал. - 1979. - №3. - С. 55-57.

103. Щуцкий В. И., Ляхомский А. В., Курбатова О. А. Совершенствование методики анализа причин электротравматизма на горных предприятиях // Безопасность труда в промышленности. - 1987. - №1. - С. 50-51.

104. Щуцкий В. И., Прудников В. С., Гайдашев В. И. Совершенствование аппаратуры защитного отключения шахтных электрических сетей // Безопасность труда в промышленности. - 1983. - №12. - С. 28-30.

105. Щуцкий В. И., Сидоров А. И. Безопасность при эксплуатации электротехнических систем. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. - 282 с.

106. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности / Гладилин Л. В., Щуцкий В. И., Бацежев Ю. Г., Чеботаев Н. И., - М.: Недра, 1977. - 327 с.

107. Ягудаев Б. М., Шишкин Н. Ф., Назаров В. В. Защита от электропоражения в горной промышленности. - М.: Недра, 1982. - 152 с.

108. Determination of the Dielectric Characteristics of Electric Equipment Insulation in the Presence of Utility-Frequency Interference Currents, Shinkarenko, G.V., Power Technology and Engineering, 50(3), c. 341-346, 2016.

109. Diagnosis of inhomogeneous insulation degradation in electric cables by distributed shunt conductance estimation, Zhang, Q., Tang, H., Control Engineering Practice 21(9), c. 1195-1203, 2013.

110. Gregory A. Kimble How to Use (And Misuse) Statistics. - USA: Prentice Hall Direct, 1978. - 292 c.

111. Insulation status mobile monitoring for power cable based on a novel fringing electric field method, Liang, M.-Y., Dian, S.-Y., Liu, T., Lecture Notes in Electrical Engineering 138 LNEE, c. 987-994, 2012.

112. Using ultraviolet imaging method to detect the external insulation faults of electric device, Zang, C., Ye, H., Lei, H., (...), He, S., Zhao, X., Annual Report - Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, CEIDP 5377769, c. 26-30, 2009.

Приложение А.

Интервальные вариационные ряды активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости шахтных электрических сетей

Таблица А.1 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Печорского бассейна

Интервалы активного сопротивления изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-4	0,1	4,0	2,0	0,25	0,50	8,34
4,1-8	4,1	8,0	6,0	0,35	2,09	1,07
8,1-12	8,1	12,0	10,0	0,22	2,22	1,12
12,1-16	12,1	16,0	14,0	0,07	0,92	2,58
16,1-20	16,1	20,0	18,0	0,11	2,02	11,76
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 7,75$	$\sigma_R^2 = 24,87$

Таблица А.2 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Печорского бассейна

Интервалы емкостного сопротивления изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-3	0,1	3,0	1,5	0,55	0,82	4,27
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,24	1,09	0,01
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,08	0,62	0,85
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,04	0,42	1,54
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,03	0,37	2,29
15,1-18	15,1	18,0	16,5	0,06	0,97	8,80
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 4,29$	$\sigma_X^2 = 17,76$

Таблица А.3 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Печорского бассейна

Интервалы полного сопротивл ения изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
0-3	0,1	3,0	1,5	0,58	0,87	2,99
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,27	1,22	0,15
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,07	0,51	0,95
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,01	0,15	0,63
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,03	0,37	2,56
15,1-18	15,1	18,0	16,5	0,04	0,66	6,48
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 3,78$	$\sigma_Z^2 = 13,76$

Таблица А.4 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Печорского бассейна

Интервалы емкости относител ьно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot$ P_i , мкФ ²
0,01-0,5	0,01	0,5	0,25	0,20	0,05	0,28
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,24	0,18	0,11
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,19	0,23	0,01
1,51-2,0	1,51	2,0	1,75	0,13	0,23	0,01
2,01-2,5	2,01	2,5	2,25	0,06	0,14	0,04
2,51-3,0	2,51	3,0	2,75	0,06	0,17	0,10
3,01-3,5	3,01	3,5	3,25	0,06	0,20	0,20
3,51-4,0	3,51	4,0	3,75	0,02	0,08	0,11
4,01-4,5	4,01	4,5	4,25	0,04	0,17	0,32
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 1,45$	$\sigma_C^2 = 1,18$

Таблица А.5 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кизеловского бассейна

Интервалы активного сопротивл ения изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
0-4	0,1	4,0	2,0	0,41	0,82	7,77

Продолжение таблицы А.5

Интервалы активного сопротивл ения изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
4,1-8	4,1	8,0	6,0	0,35	2,09	0,04
8,1-12	8,1	12,0	10,0	0,08	0,76	1,01
12,1-16	12,1	16,0	14,0	0,08	1,06	4,45
16,1-20	16,1	20,0	18,0	0,08	1,62	12,21
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 6,35$	$\sigma_R^2 = 25,48$

Таблица А.6 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кизеловского бассейна

Интервалы емкостног о сопротивл ения изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
0-3	0,1	3,0	1,5	0,65	0,96	1,74
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,27	1,22	0,50
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,03	0,25	0,63
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,02	0,23	1,19
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,01	0,15	1,18
15,1-18	15,1	18,0	16,5	0,02	0,33	3,57
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 3,14$	$\sigma_X^2 = 8,81$

Таблица А.7 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кизеловского бассейна

Интервалы полного сопротивл ения изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
0-2	0,1	2,0	1,0	0,46	0,46	1,35
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,37	1,11	0,03
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,09	0,47	0,49
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,03	0,15	0,41
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,03	0,29	1,28
10,1-12	10,1	12,0	11,0	0,02	0,23	1,44

Продолжение таблицы А.7

Интервалы полного сопротивл ения изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 2,71$	$\sigma_Z^2 = 5,00$

Таблица А.8 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Кизеловского бассейна

Интервалы емкости относитель но земли C , мкФ	Минималь ное значение интервала C_{min} , мкФ	Максималь ное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,01-0,5	0,01	0,5	0,25	0,08	0,02	0,16
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,23	0,17	0,17
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,26	0,32	0,04
1,51-2,0	1,51	2,0	1,75	0,15	0,27	0,00
2,01-2,5	2,01	2,5	2,25	0,11	0,25	0,04
2,51-3,0	2,51	3,0	2,75	0,04	0,12	0,06
3,01-3,5	3,01	3,5	3,25	0,05	0,18	0,14
3,51-4,0	3,51	4,0	3,75	0,02	0,08	0,10
4,01-4,5	4,01	4,5	4,25	0,02	0,05	0,08
4,51-5,0	4,51	5,0	4,75	0,04	0,17	0,34
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 1,63$	$\sigma_C^2 = 1,13$

Таблица А.9 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Норильского региона

Интервалы активного сопротивл ения изоляции R , кОм	Минималь ное значение интервала R_{min} , кОм	Максималь ное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-4	0,1	4,0	2,0	0,05	0,10	2,77
4,1-8	4,1	8,0	6,0	0,38	2,29	4,94
8,1-12	8,1	12,0	10,0	0,29	2,87	0,05
12,1-16	12,1	16,0	14,0	0,19	2,67	3,70
16,1-20	16,1	20,0	18,0	0,09	1,67	6,56
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 9,60$	$\sigma_R^2 = 18,02$

Таблица А.10 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Норильского региона

Интервалы емкостного сопротивления изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-2	0,1	2,0	1,0	0,41	0,41	2,29
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,29	0,85	0,04
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,13	0,67	0,36
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,09	0,66	1,25
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,04	0,35	1,24
10,1-12	10,1	12,0	11,0	0,04	0,42	2,22
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 3,36$	$\sigma_X^2 = 7,40$

Таблица А.11 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Норильского региона

Интервалы полного сопротивления изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-2	0,1	2,0	1,0	0,42	0,42	2,00
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,29	0,87	0,01
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,16	0,81	0,53
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,07	0,46	0,95
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,03	0,29	1,08
10,1-12	10,1	12,0	11,0	0,03	0,34	1,89
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 3,19$	$\sigma_Z^2 = 6,46$

Таблица А.12 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Норильского региона

Интервалы емкости относительно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,01-0,5	0,01	0,5	0,25	0,07	0,02	0,10
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,23	0,17	0,12
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,29	0,36	0,02
1,51-2,0	1,51	2,0	1,75	0,18	0,34	0,02

Продолжение таблицы А.12

Интервалы емкости относительно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
2,01-2,5	2,01	2,5	2,25	0,13	0,29	0,08
2,51-3,0	2,51	3,0	2,75	0,03	0,09	0,05
3,01-3,5	3,01	3,5	3,25	0,07	0,21	0,21
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 1,48$	$\sigma_C^2 = 0,60$

Таблица А.13 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона

Интервалы активного сопротивления изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-2	0,1	2,0	1,0	0,10	0,10	1,98
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,31	0,93	2,04
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,14	0,69	0,04
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,21	1,57	0,46
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,14	1,24	1,63
10,1-12	10,1	12,0	11,0	0,10	1,03	2,78
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 5,56$	$\sigma_R^2 = 8,93$

Таблица А.14 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона

Интервалы емкостного сопротивления изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-3	0,1	3,0	1,5	0,54	0,80	2,45
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,34	1,55	0,25
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,03	0,23	0,46
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,06	0,66	2,96
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,03	0,41	2,91
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 3,65$	$\sigma_X^2 = 9,03$

Таблица А.15 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона

Интервалы полного сопротивления изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-1	0,1	1,0	0,5	0,25	0,13	0,56
1,1-2	1,1	2,0	1,5	0,41	0,61	0,10
2,1-3	2,1	3,0	2,5	0,09	0,23	0,02
3,1-4	3,1	4,0	3,5	0,09	0,33	0,21
4,1-5	4,1	5,0	4,5	0,16	0,70	0,98
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 2,00$	$\sigma_Z^2 = 1,87$

Таблица А.16 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Восточно-Сибирского региона

Интервалы емкости относительно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,01-1,5	0,01	1,5	0,75	0,15	0,11	1,05
1,51-3,0	1,51	3,0	2,25	0,33	0,75	0,46
3,01-4,5	3,01	4,5	3,75	0,11	0,42	0,01
4,51-6,0	4,51	6,0	5,25	0,41	2,14	1,37
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 3,42$	$\sigma_C^2 = 2,89$

Таблица А.17 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Якутского региона

Интервалы активного сопротивления изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-3	0,1	3,0	1,5	0,25	0,38	10,16
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,13	0,56	1,42
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,25	1,88	0,04
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,13	1,31	0,86
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,12	1,69	3,96
15,1-18	15,1	18,0	16,5	0,12	2,06	9,30

Продолжение таблицы А.17

Интервалы активного сопротивления изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 7,88$	$\sigma_R^2 = 25,74$

Таблица А.18 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Якутского региона

Интервалы емкостного сопротивления изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-2	0,1	2,0	1,0	0,38	0,38	2,24
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,29	0,87	0,06
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,18	0,89	0,44
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,09	0,63	1,14
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,02	0,20	0,68
10,1-12	10,1	12,0	11,0	0,04	0,47	2,46
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 3,44$	$\sigma_X^2 = 7,02$

Таблица А.19 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Якутского региона

Интервалы полного сопротивления изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-2	0,1	2,0	1,0	0,18	0,18	1,19
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,46	1,37	0,14
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,26	1,34	0,56
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,10	0,67	1,14
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 3,56$	$\sigma_Z^2 = 3,03$

Таблица А.20 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Якутского региона

Интервалы емкости относительно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,01-0,5	0,01	0,5	0,25	0,183	0,045	0,054
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,545	0,406	0,001
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,272	0,339	0,056
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 0,80$	$\sigma_C^2 = 0,11$

Приложение Б.

Интервальные вариационные ряды активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости рудничных электрических сетей

Таблица Б.1 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников комбината «Апатит»

Интервалы активного сопротивления изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-2	0,1	2,0	1,0	0,25	0,25	1,44
2,1-4	2,1	4,0	3,0	0,38	1,13	0,06
4,1-6	4,1	6,0	5,0	0,31	1,56	0,80
6,1-8	6,1	8,0	7,0	0,05	0,35	0,65
8,1-10	8,1	10,0	9,0	0,01	0,12	0,41
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 3,41$	$\sigma_R^2 = 3,36$

Таблица Б.2 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников комбината «Апатит»

Интервалы емкостного сопротивления изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-1	0,1	1,0	0,5	0,17	0,08	0,25
1,1-2	1,1	2,0	1,5	0,61	0,92	0,03
2,1-3	2,1	3,0	2,5	0,11	0,28	0,07
3,1-4	3,1	4,0	3,5	0,06	0,21	0,19
4,1-5	4,1	5,0	4,5	0,05	0,23	0,39
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 1,72$	$\sigma_X^2 = 0,93$

Таблица Б.3 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников комбината «Апатит»

Интервалы полного сопротивления изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-1	0,1	1,0	0,5	0,35	0,18	0,36

Продолжение таблицы Б.3

Интервалы полного сопротивл ения изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot P_i$, кОм ²
1,1-2	1,1	2,0	1,5	0,49	0,75	0,00
2,1-3	2,1	3,0	2,5	0,04	0,09	0,04
3,1-4	3,1	4,0	3,5	0,04	0,13	0,14
4,1-5	4,1	5,0	4,5	0,04	0,16	0,32
5,1-6	5,1	6,0	5,5	0,04	0,19	0,56
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 1,50$	$\sigma_Z^2 = 1,42$

Таблица Б.4 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников комбината «Апатит»

Интервалы емкости относитель но земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,11	0,08	0,22
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,06	0,07	0,05
1,51-2,0	1,51	2,0	1,75	0,28	0,49	0,05
2,01-2,5	2,01	2,5	2,25	0,28	0,62	0,00
2,51-3,0	2,51	3,0	2,75	0,11	0,31	0,04
3,01-3,5	3,01	3,5	3,25	0,06	0,18	0,07
3,51-4,0	3,51	4,0	3,75	0,10	0,42	0,28
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 2,17$	$\sigma_C^2 = 0,71$

Таблица Б.5 – Вариационный интервальный ряд активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников Восточно-Сибирского региона

Интервалы активного сопротивл ения изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot P_i$, кОм ²
0-4	0,1	4,0	2,0	0,45	0,90	5,49
4,1-8	4,1	8,0	6,0	0,35	2,09	0,09
8,1-12	8,1	12,0	10,0	0,12	1,23	2,50
12,1-16	12,1	16,0	14,0	0,04	0,56	2,89

Продолжение таблицы Б.5

Интервалы активного сопротивл ения изоляции R , кОм	Минимальное значение интервала R_{min} , кОм	Максимальное значение интервала R_{max} , кОм	Значение середины интервала R_i , кОм	Частость P_i	$R_i P_i$, кОм	$(R_i - \bar{R})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
16,1-20	16,1	20,0	18,0	0,04	0,72	6,25
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{R} = 5,50$	$\sigma_R^2 = 17,22$

Таблица Б.6 – Вариационный интервальный ряд емкостного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников Восточно-Сибирского региона

Интервалы емкостного сопротивле ния изоляции X , кОм	Минимальное значение интервала X_{min} , кОм	Максимальное значение интервала X_{max} , кОм	Значение середины интервала X_i , кОм	Частость P_i	$X_i P_i$, кОм	$(X_i - \bar{X})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
0-3	0,1	3,0	1,5	0,27	0,41	6,41
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,29	1,31	1,01
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,15	1,10	0,19
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,17	1,75	2,86
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,08	1,13	4,28
15,1-18	15,1	18,0	16,5	0,04	0,66	4,11
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{X} = 6,36$	$\sigma_X^2 = 18,86$

Таблица Б.7 – Вариационный интервальный ряд полного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников Восточно-Сибирского региона

Интервалы полного сопротивл ения изоляции Z , кОм	Минимальное значение интервала Z_{min} , кОм	Максимальное значение интервала Z_{max} , кОм	Значение середины интервала Z_i , кОм	Частость P_i	$Z_i P_i$, кОм	$(Z_i - \bar{Z})^2 \cdot$ P_i , кОм ²
0-3	0,1	3,0	1,5	0,48	0,71	5,28
3,1-6	3,1	6,0	4,5	0,23	1,04	0,03
6,1-9	6,1	9,0	7,5	0,08	0,58	0,55
9,1-12	9,1	12,0	10,5	0,15	1,62	4,95
12,1-15	12,1	15,0	13,5	0,05	0,69	3,83
15,1-18	15,1	18,0	16,5	0,01	0,20	1,63
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{Z} = 4,84$	$\sigma_Z^2 = 16,27$

Таблица Б.8 – Вариационный интервальный ряд емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников Восточно-Сибирского региона

Интервалы емкости относительно земли C , мкФ	Минимальное значение интервала C_{min} , мкФ	Максимальное значение интервала C_{max} , мкФ	Значение середины интервала C_i , мкФ	Частость P_i	$C_i P_i$, мкФ	$(C_i - \bar{C})^2 \cdot P_i$, мкФ ²
0,01-0,5	0,01	0,5	0,25	0,47	0,11	0,15
0,51-1,0	0,51	1,0	0,75	0,27	0,20	0,00
1,01-1,5	1,01	1,5	1,25	0,14	0,17	0,03
1,51-2,0	1,51	2,0	1,75	0,02	0,04	0,02
2,01-2,5	2,01	2,5	2,25	0,02	0,05	0,05
2,51-3,0	2,51	3,0	2,75	0,03	0,08	0,12
3,01-3,5	3,01	3,5	3,25	0,02	0,07	0,14
3,51-4,0	3,51	4,0	3,75	0,02	0,05	0,14
4,01-4,5	4,01	4,5	4,25	0,01	0,04	0,14
-	-	-	-	$\sum_1^i P_i = 1,0$	$\bar{C} = 0,81$	$\sigma_C^2 = 0,79$

Приложение В.

Графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт

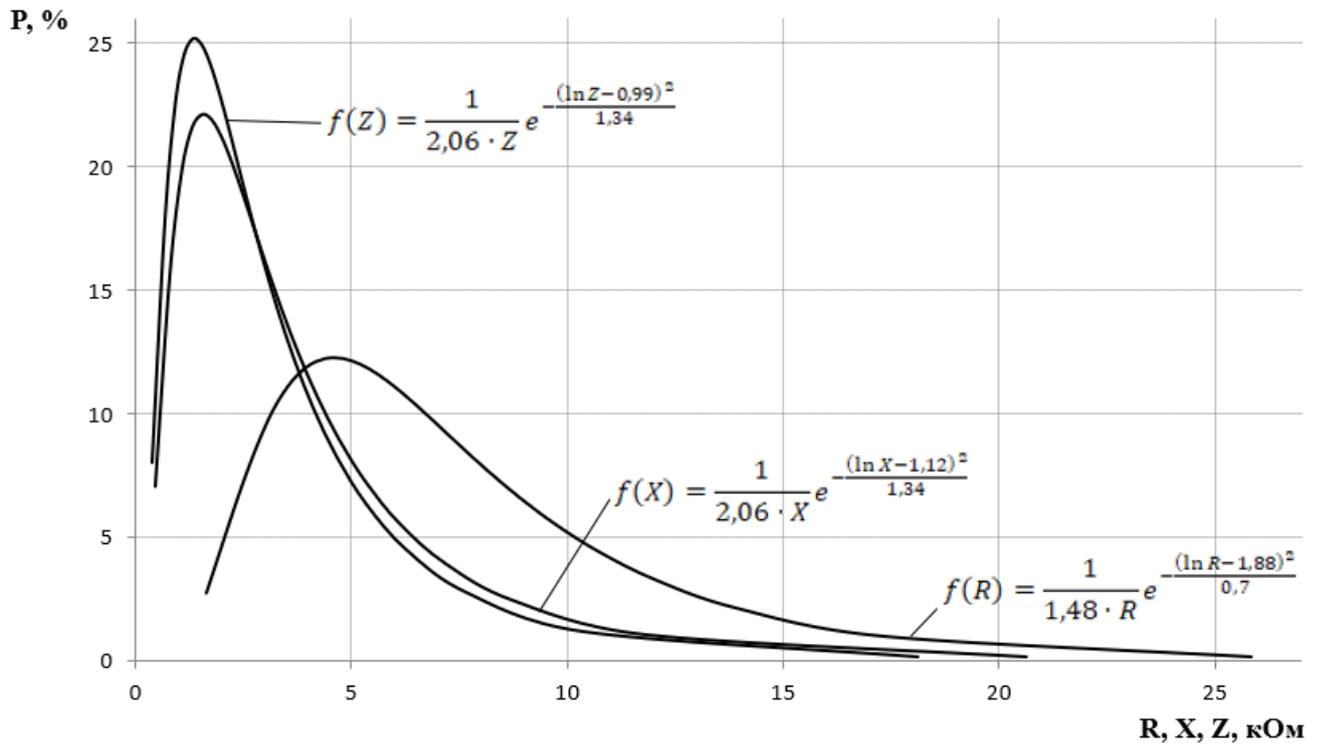


Рисунок В.1 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Печорского бассейна

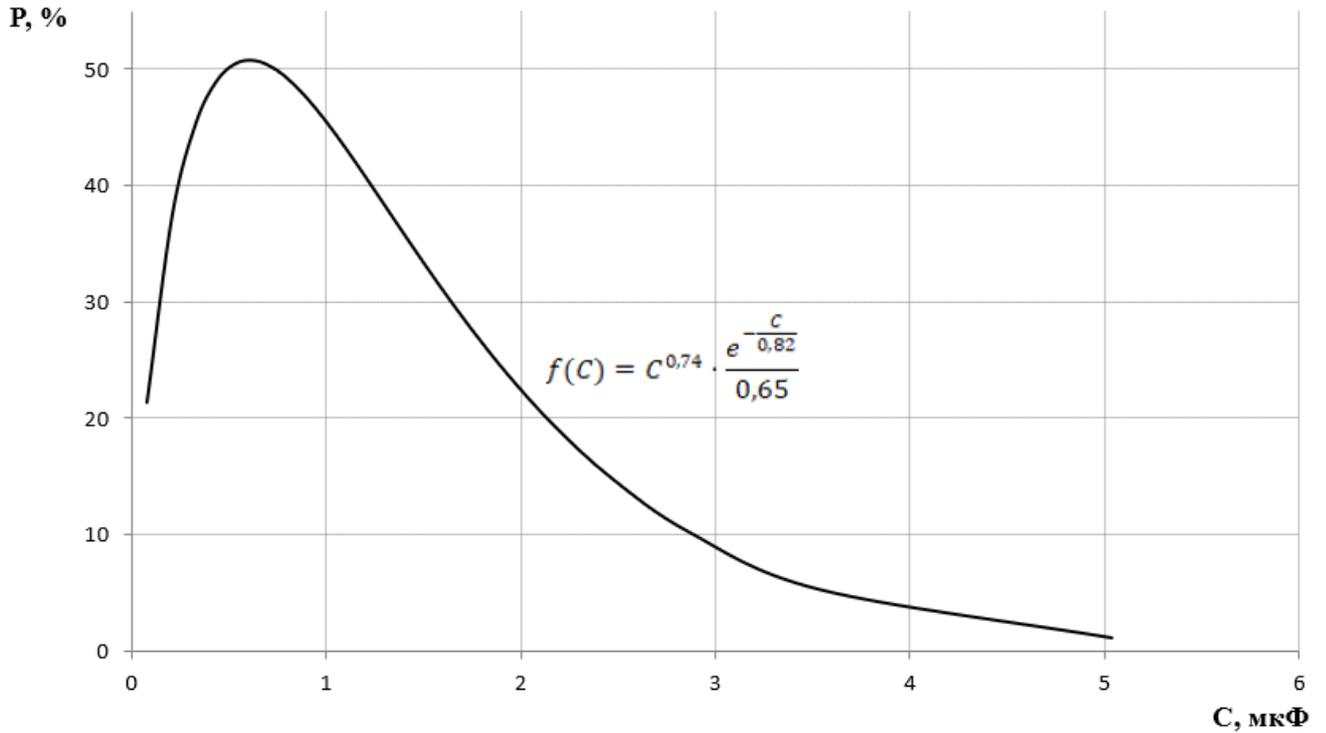


Рисунок В.2 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Печорского бассейна

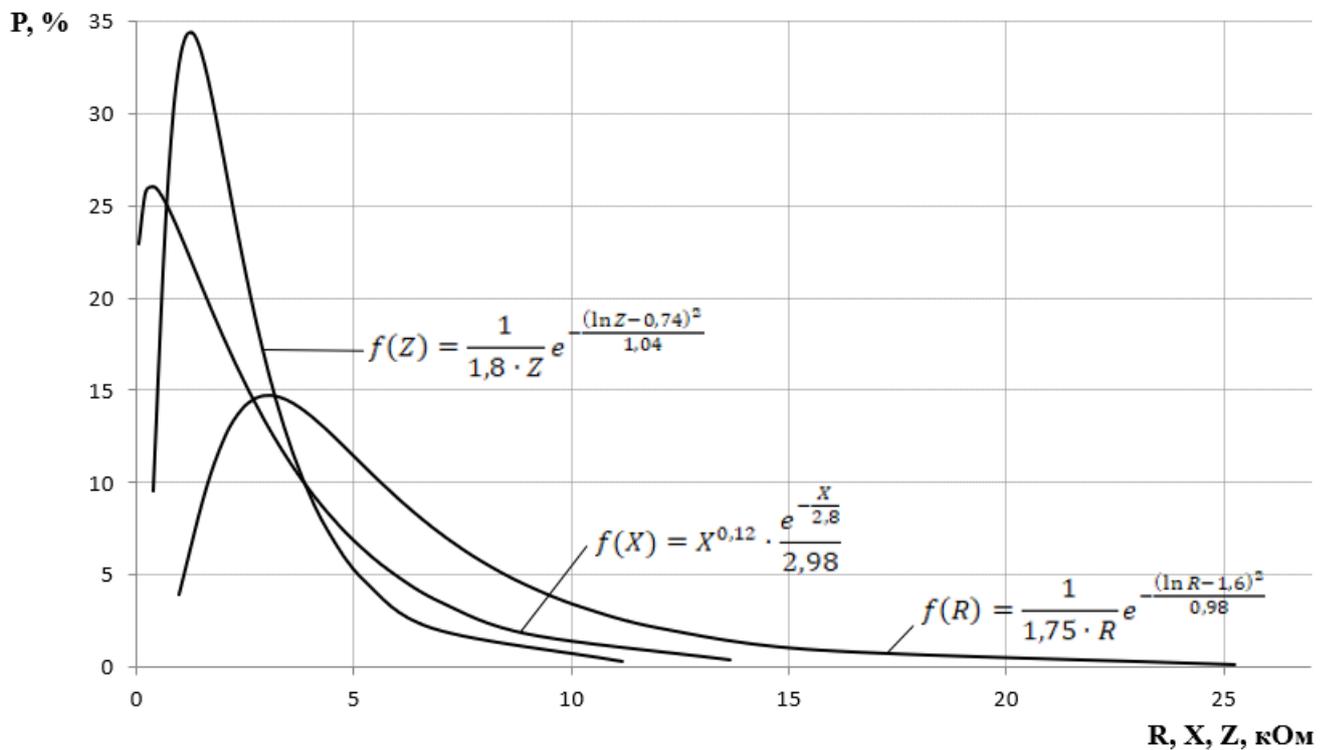


Рисунок В.3 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Кизеловского бассейна

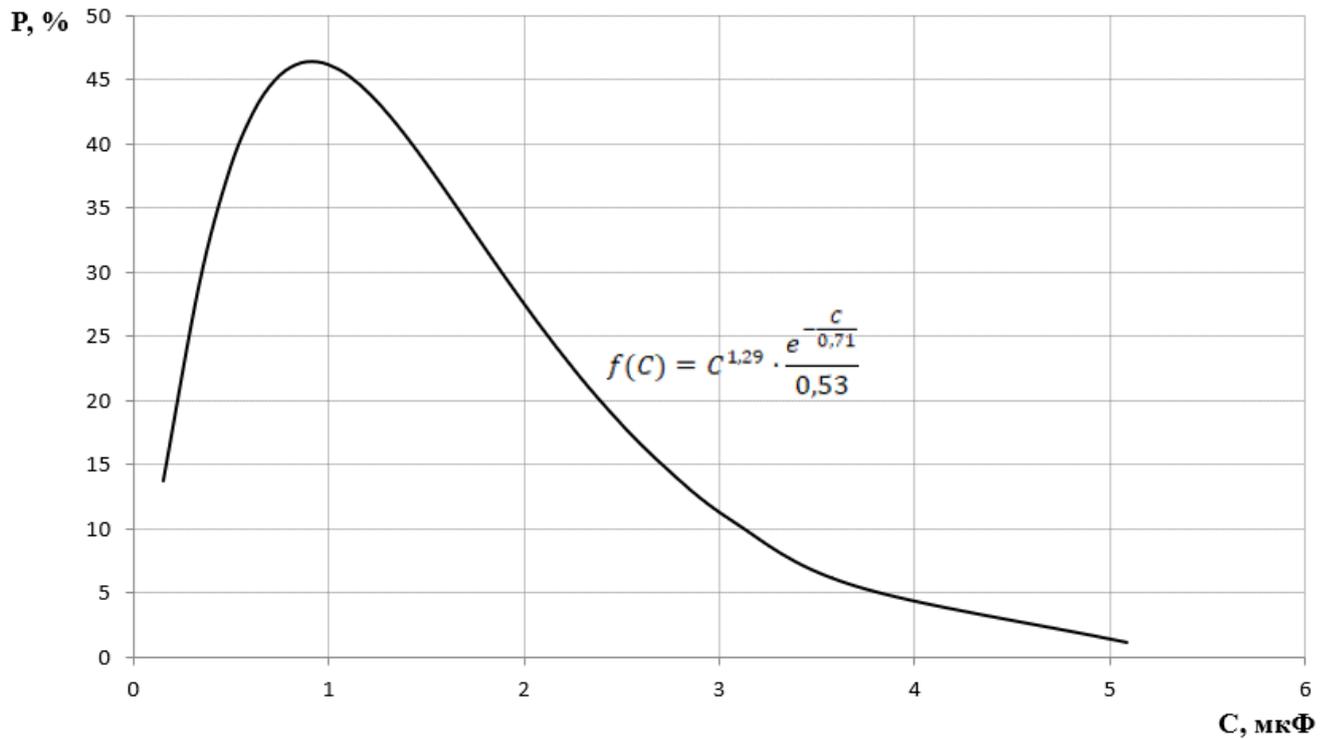


Рисунок В.4 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Кизеловского бассейна

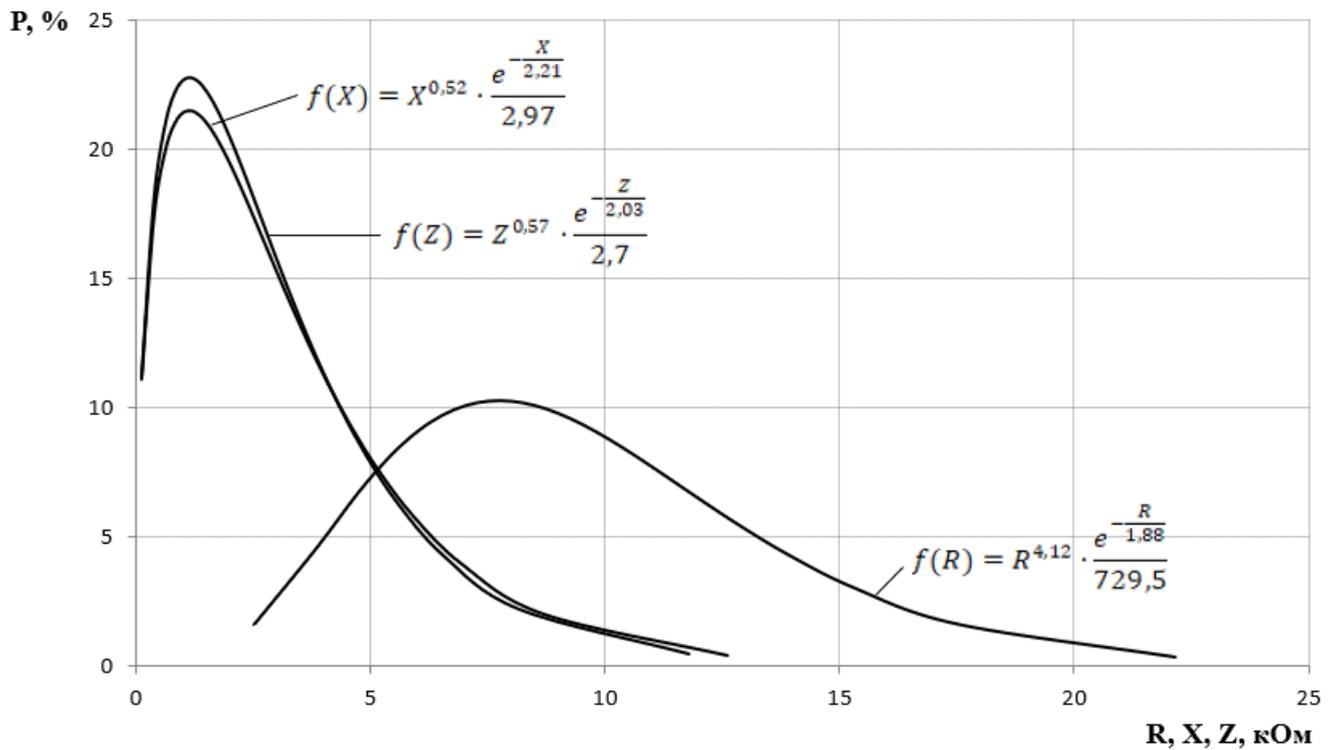


Рисунок В.5 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Норильского региона

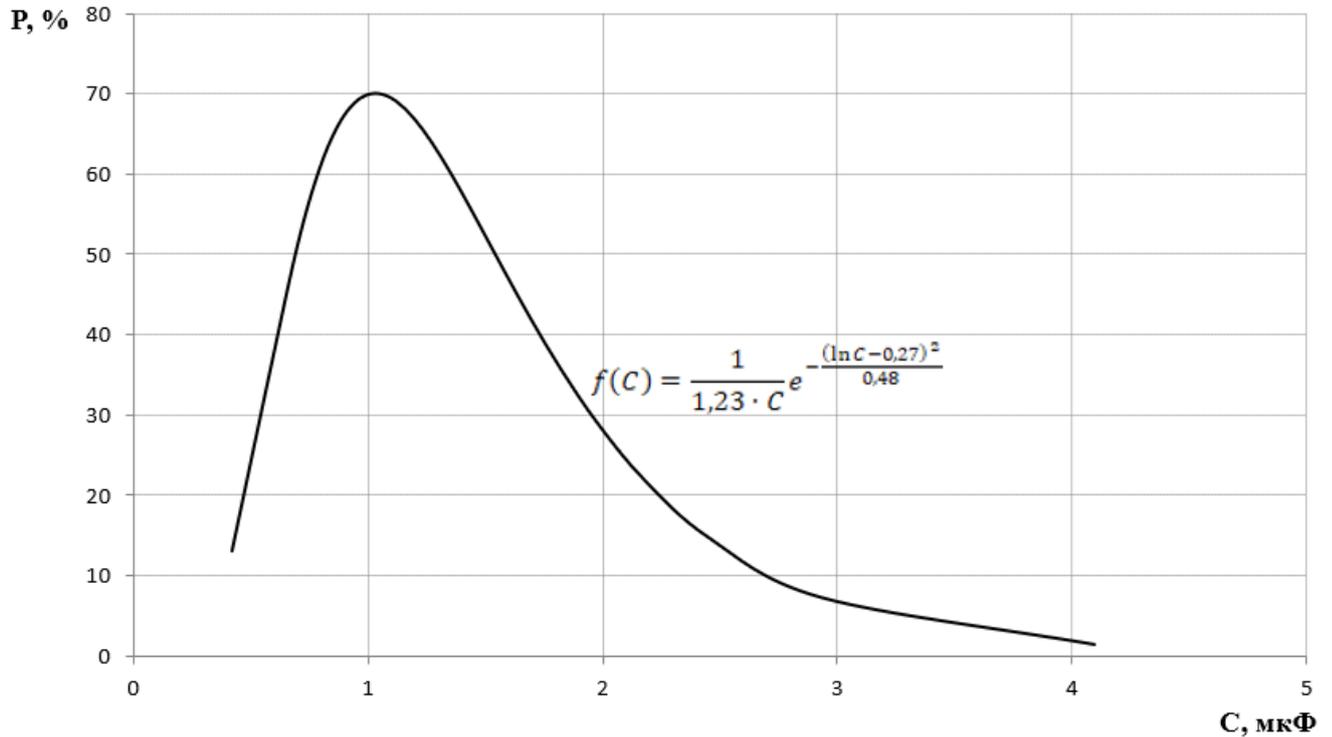


Рисунок В.6 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Норильского региона

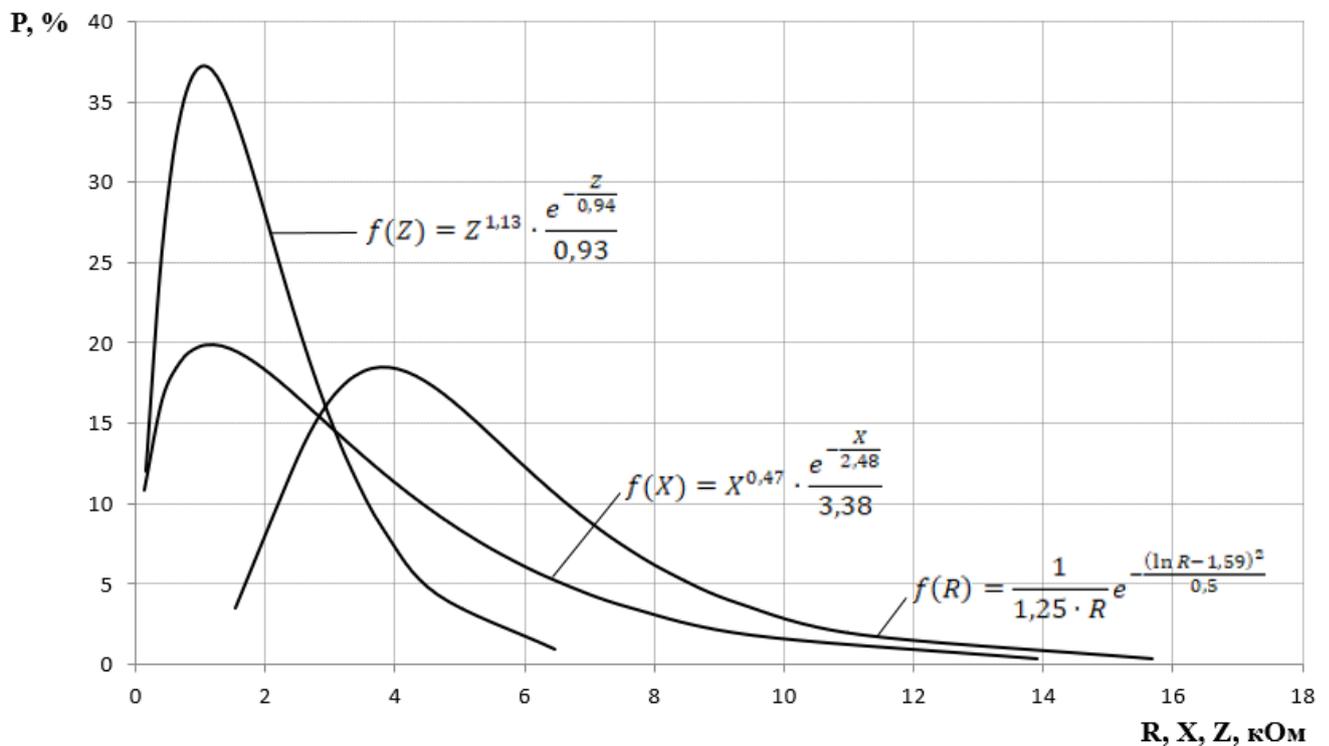


Рисунок В.7 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Восточно-Сибирского региона

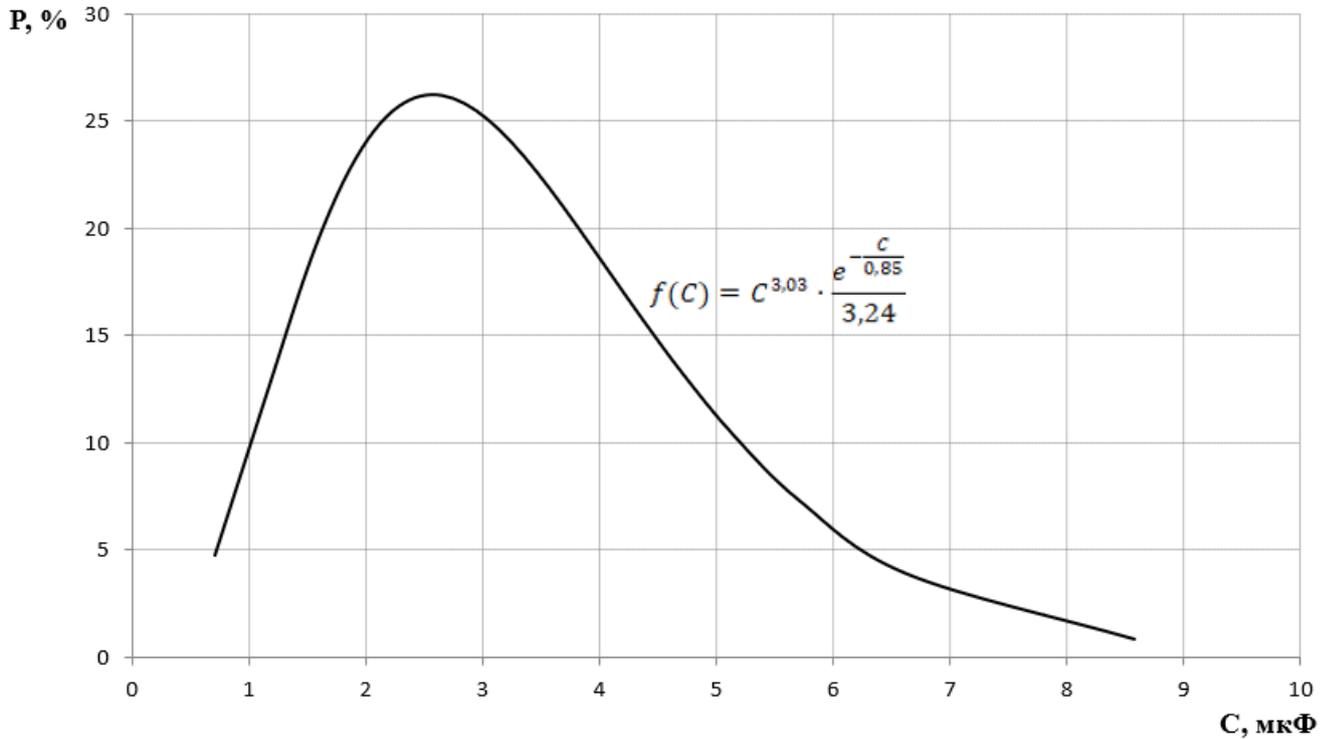


Рисунок В.8 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Восточно-Сибирского региона

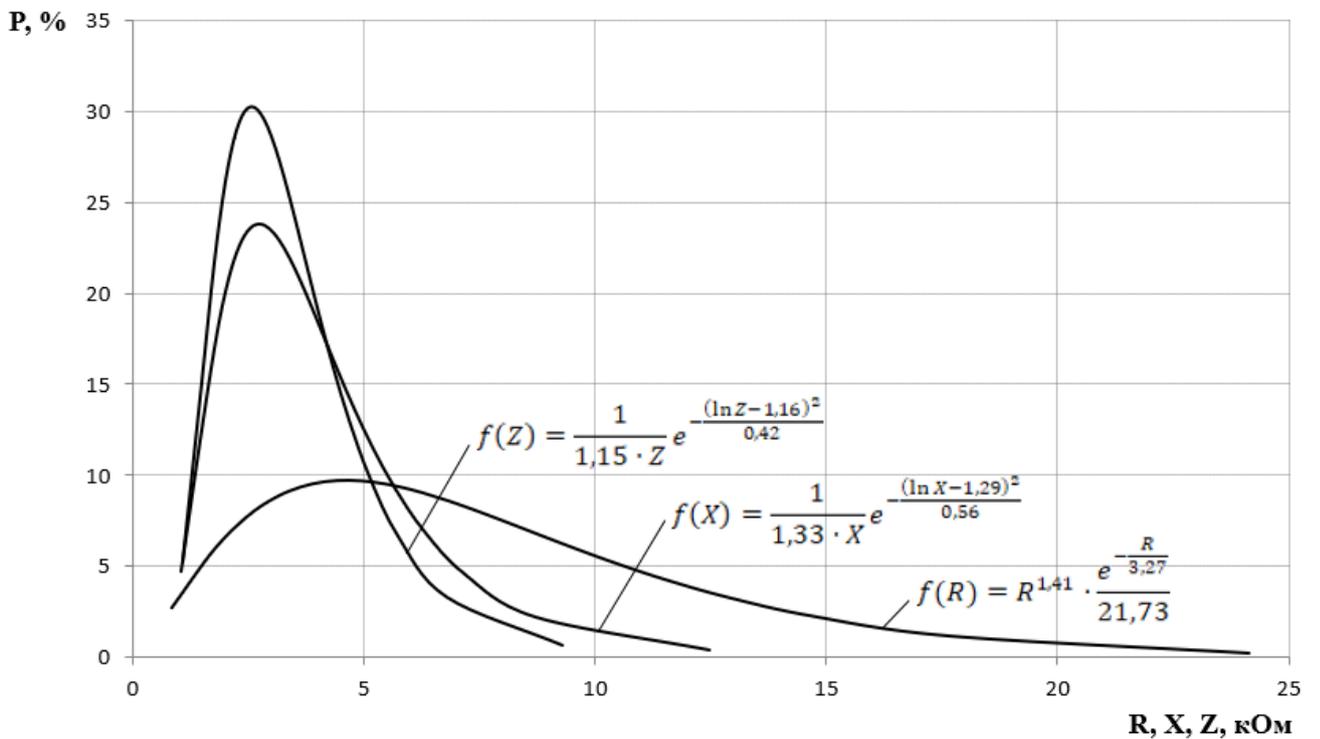


Рисунок В.9 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей угольных шахт Якутского региона

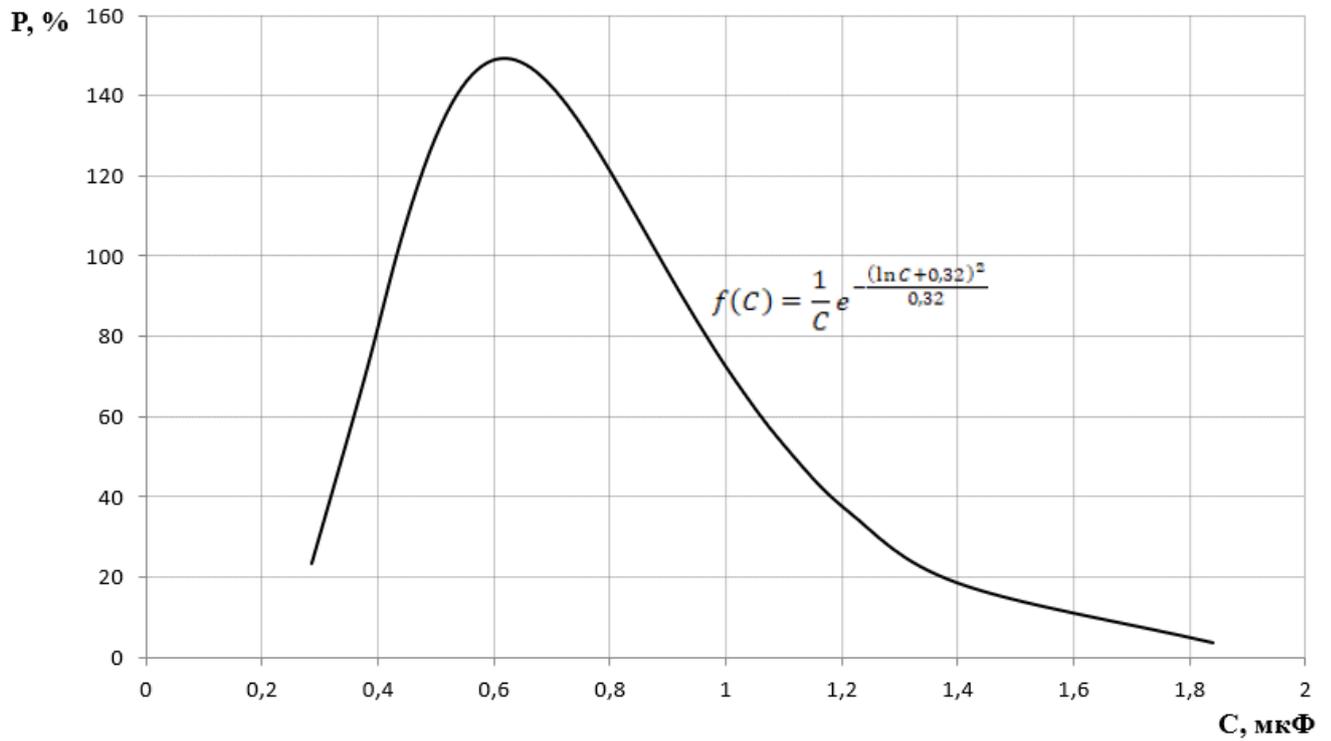


Рисунок В.10 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости подземных электрических сетей относительно земли угольных шахт Якутского региона

Приложение Г.

Графические интерпретации теоретических законов плотности распределения вероятности активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли рудников

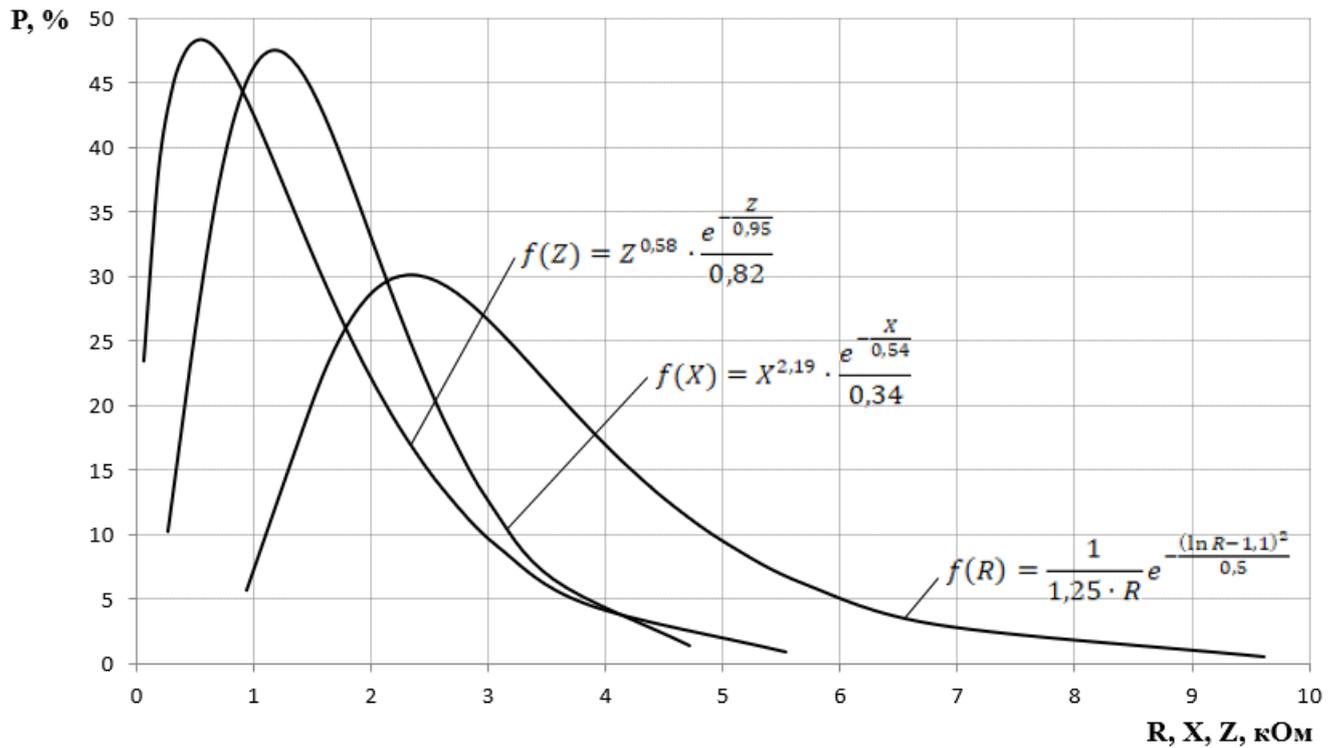


Рисунок Г.1 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции рудничных подземных электрических сетей комбината «Апатит»

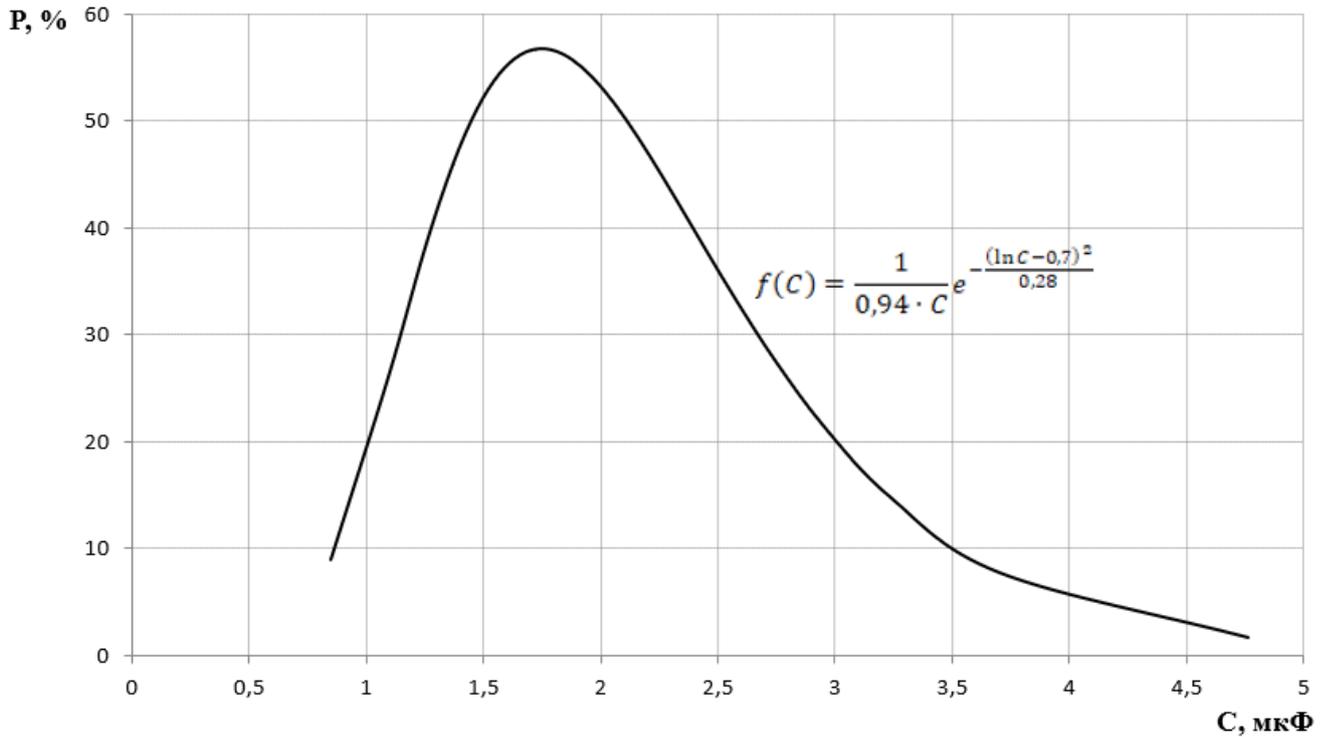


Рисунок Г.2 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли комбината «Апатит»

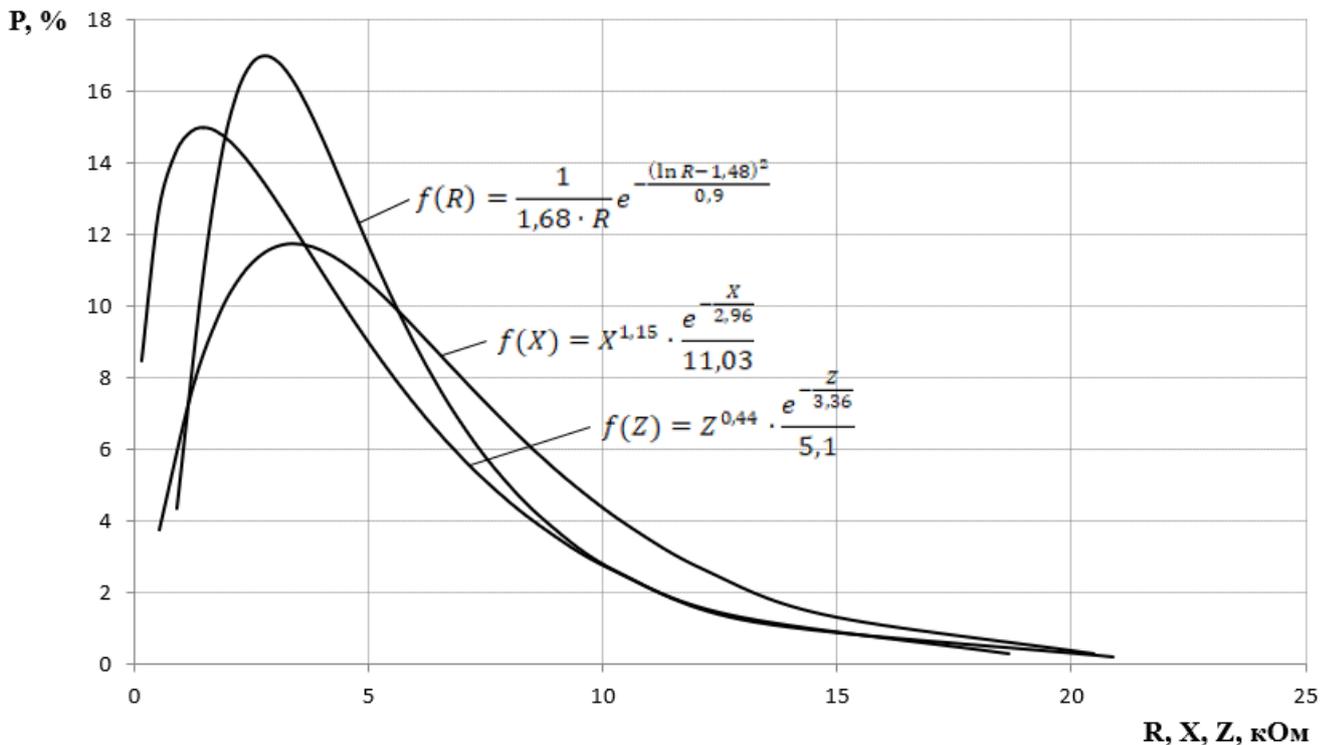


Рисунок Г.3 – Теоретические законы плотности распределения вероятности активного, емкостного и полного сопротивлений изоляции рудничных подземных электрических сетей Восточно-Сибирского региона

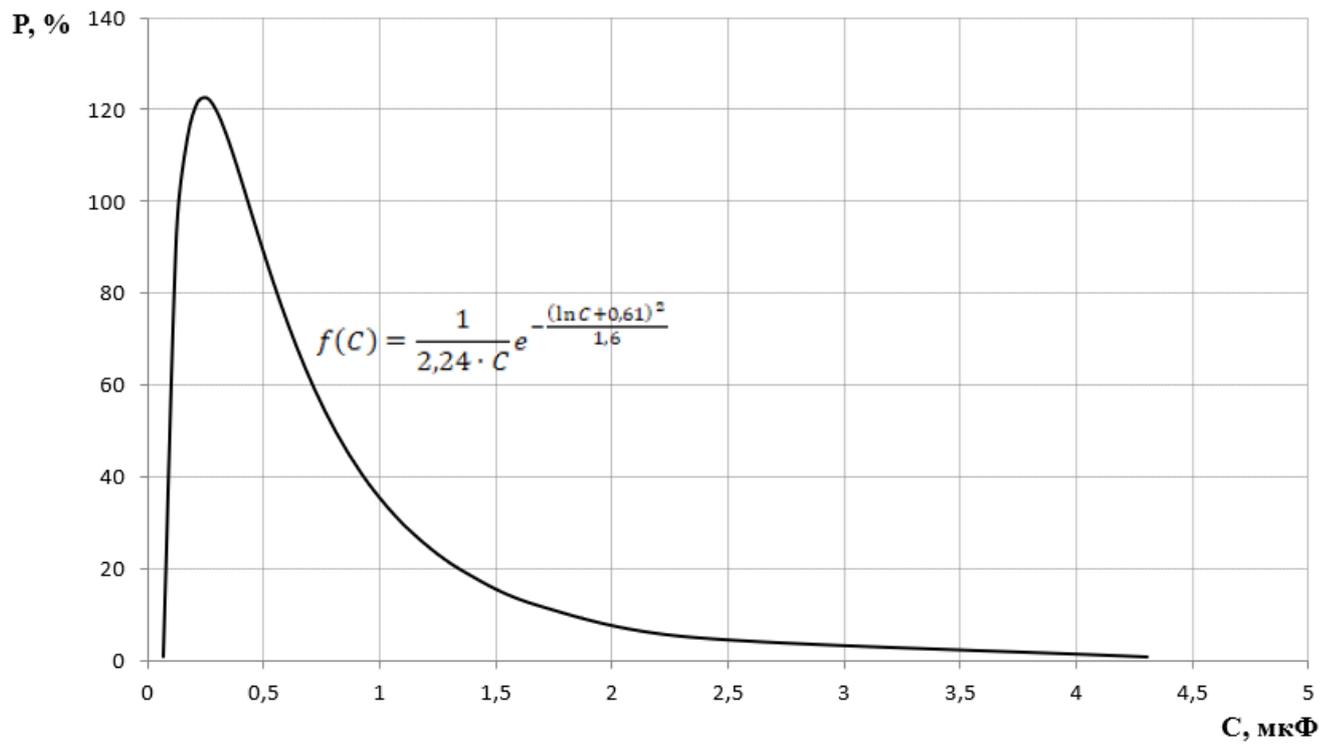


Рисунок Г.4 – Теоретические законы плотности распределения вероятности емкости рудничных подземных электрических сетей относительно земли Восточно-Сибирского региона

Приложение Д.

Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт

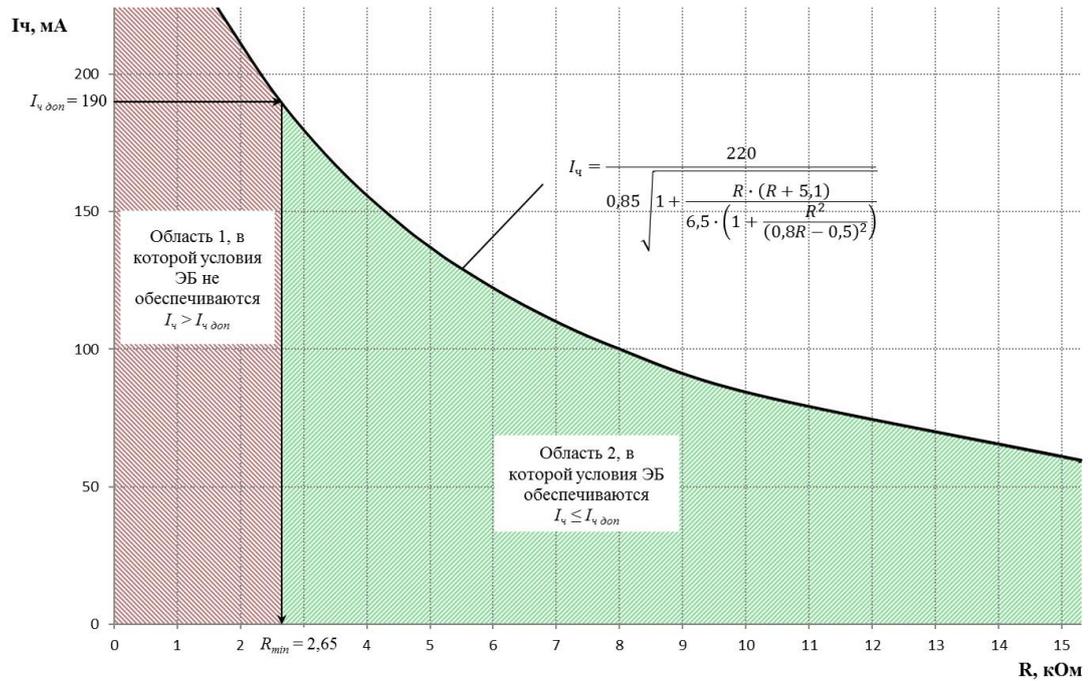


Рисунок Д.1 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого бассейна

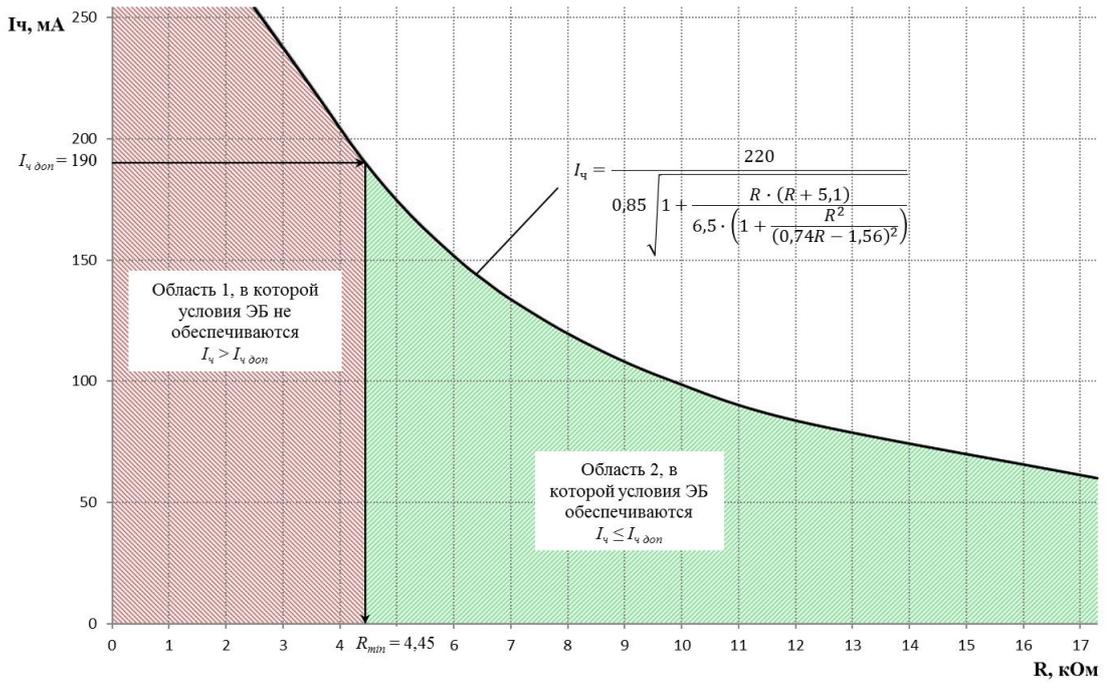


Рисунок Д.2 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Печорского бассейна

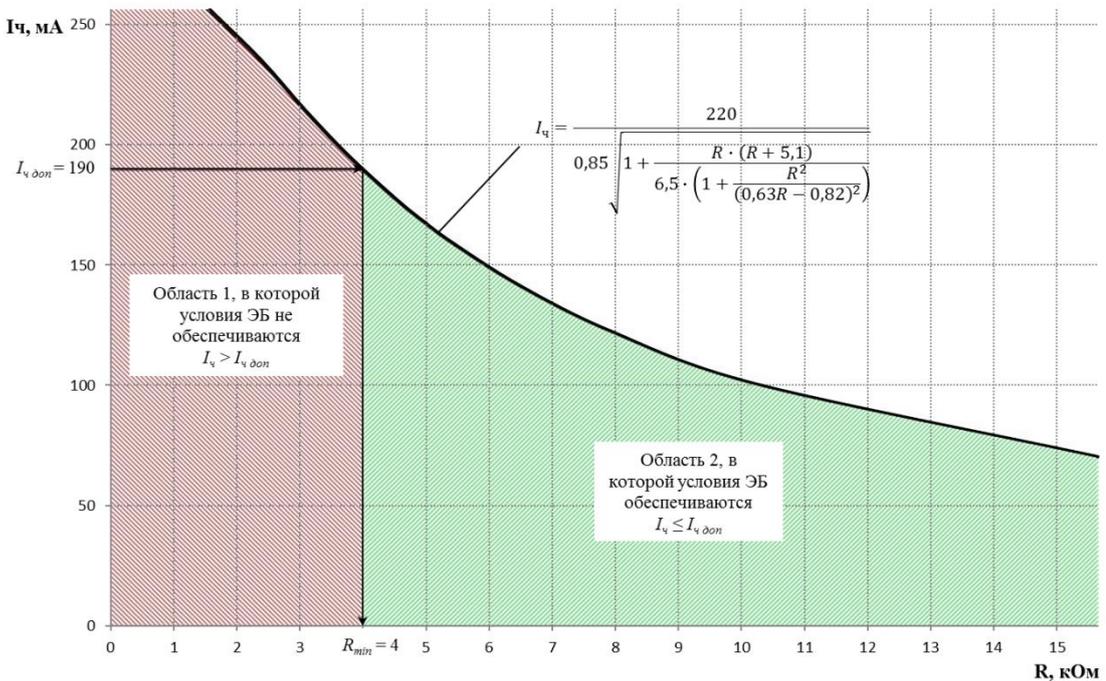


Рисунок Д.3 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кизеловского бассейна

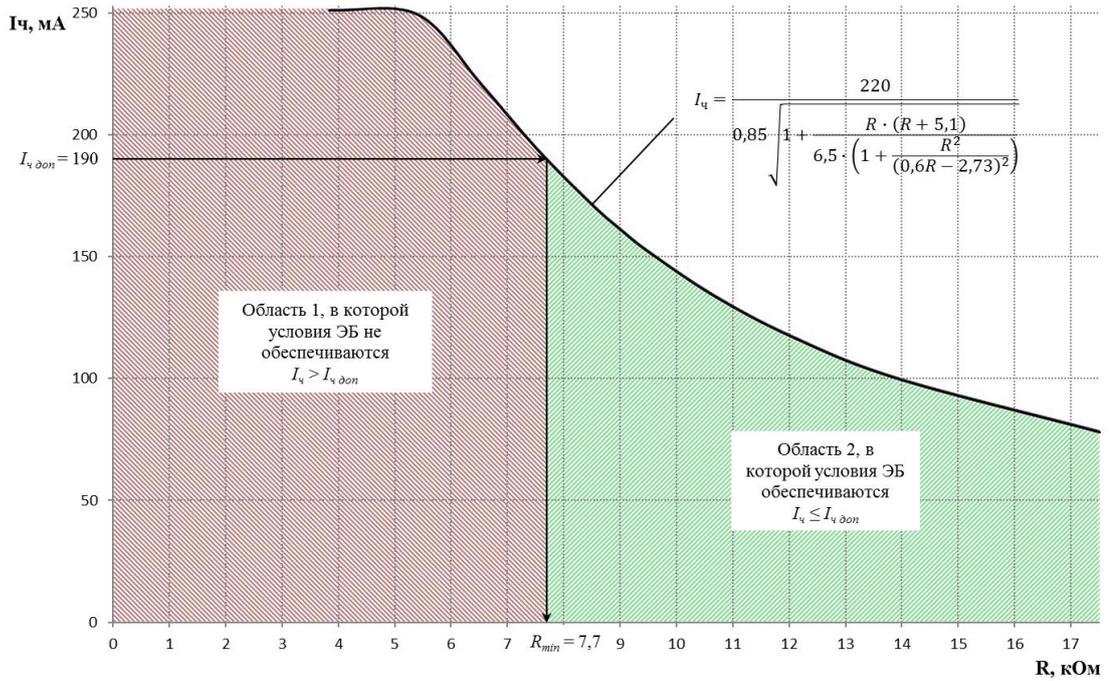


Рисунок Д.4 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Норильского региона

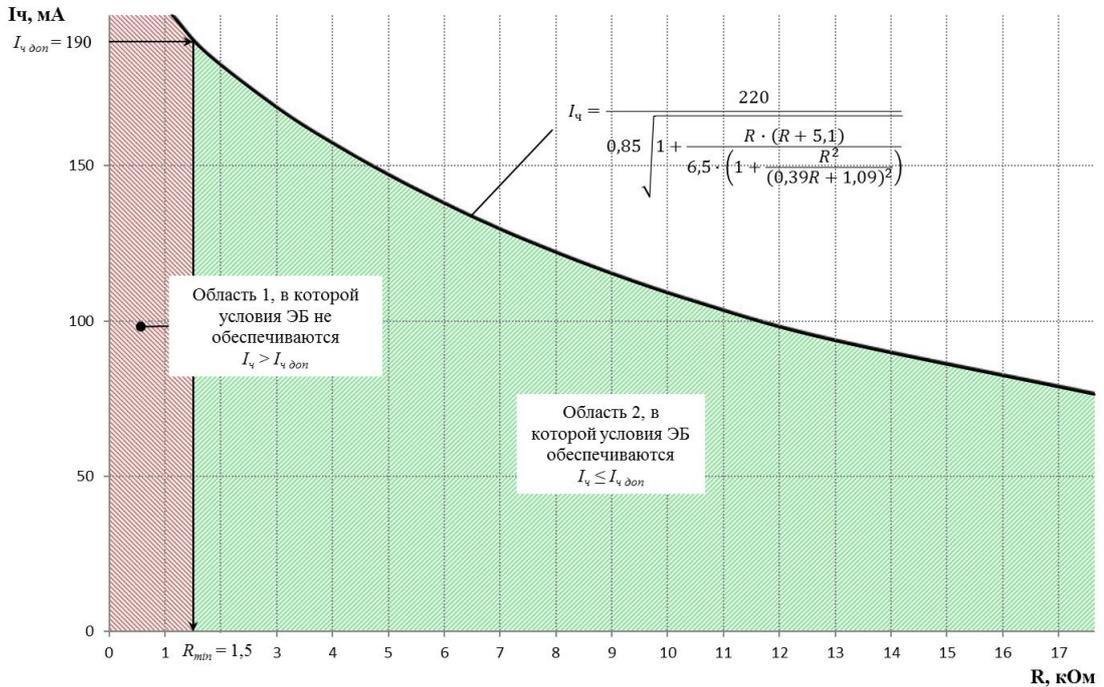


Рисунок Д.5 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Якутского региона

Приложение Е.

Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей рудников

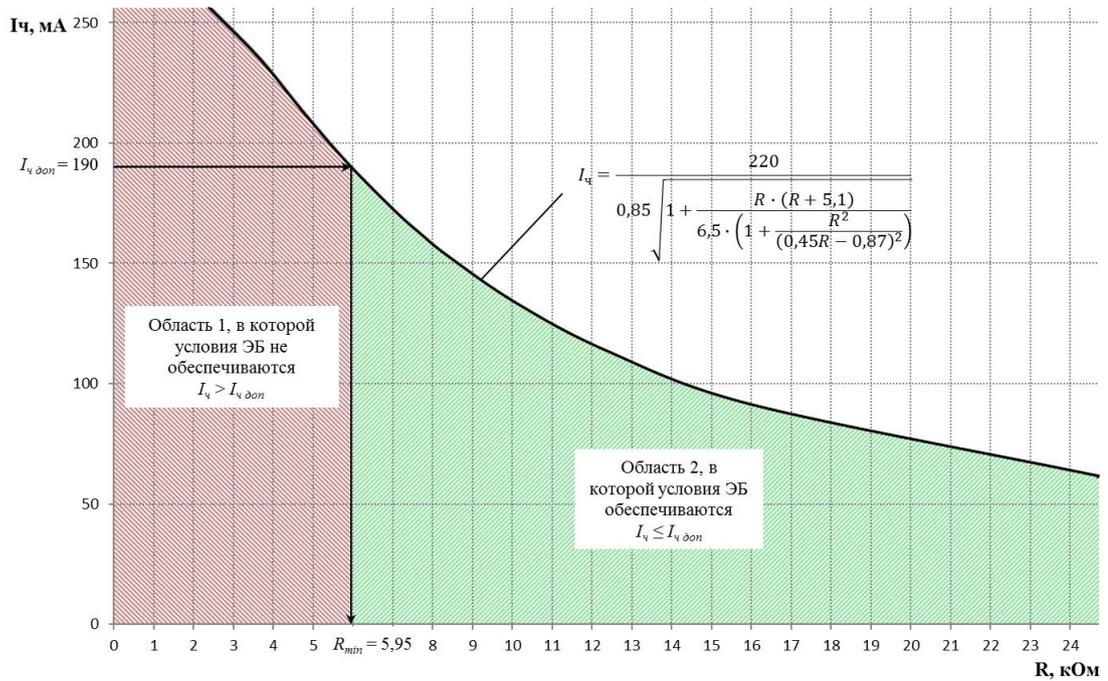


Рисунок Е.1 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей Норильского региона

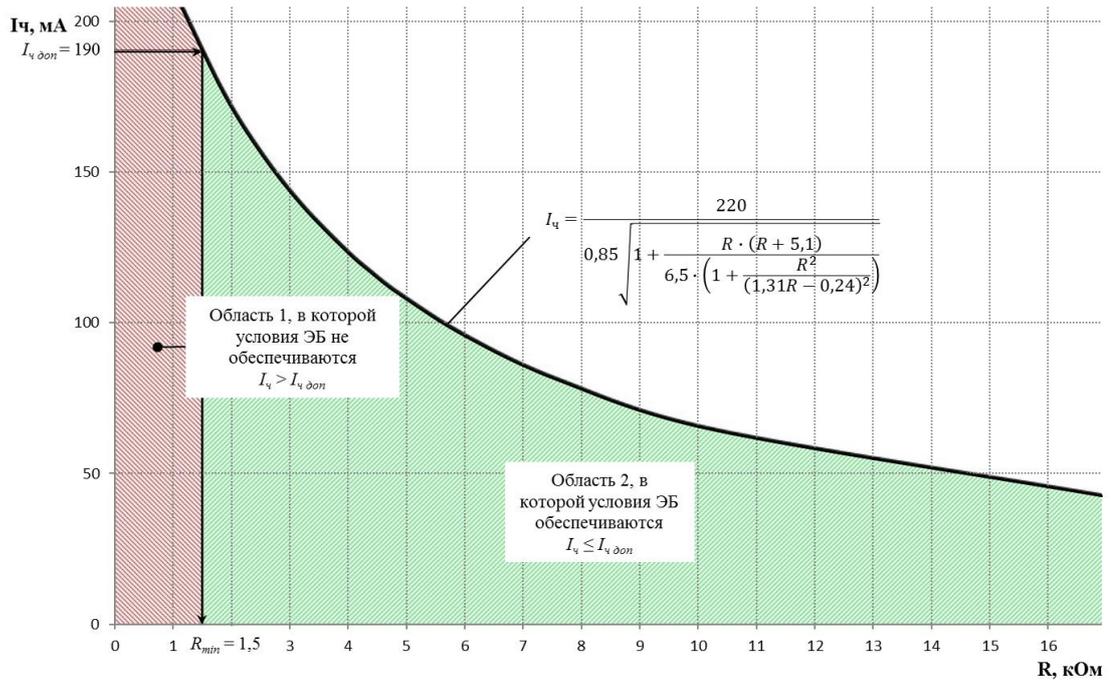


Рисунок Е.2 – Области условий электробезопасности, обусловленные зависимостью тока через человека от активного сопротивления изоляции рудничных подземных электрических сетей Восточно-Сибирского региона