

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Национальный исследовательский технологический университет МИСиС»

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)»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

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

Москва – 2019 г.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. 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.

Степень разработанности темы исследования. Существенный вклад в разработку вопросов теории и практики повышения электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий внесён исследованиями Ю. Е. Бабичева, Ю. Г. Бацежева, О. Н. Белюстина, А. А. Буралкова, Л. В. Гладилина, Ю. Д. Глухарева, Р. Н. Карякина, В. П. Колосюка, М. Е. Коростелева, А. Г. Ликаренко, А. В. Ляхомского, А. Г. Машкина, Б. Г. Меньшова, В. В. Нагорных, Г. М. Петрова, В. И. Петурова, А. В. Пичуева, А. И. Сидорова, О. Н. Синчука, В. Г. Соболева, И. Ф. Суворова, Е. Ф. Цапенко, В. И. Щуцкого и др.

В указанных исследованиях, в основном, рассматривались вопросы нормирования и контроля параметров подземных электрических сетей, определяющих условия электробезопасности, изложены принципы системного подхода к исследованиям электробезопасности, заключающегося в теоретическом обосновании, научном исследовании и практической реализации способов организации действий в системе «человек – электроустановка – среда». При этом недостаточно внимания уделено исследованию электробезопасности с учетом вероятностного подхода к явлениям, обуславливающим возникновение электротравмы, вопросам вероятностной оценки электробезопасности в аспекте статистических данных параметров изоляции электрических сетей. В этой связи рассматриваемая тема требует дальнейшего развития.

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 диссертационной 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**:

- 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.

- 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.

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

- 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.

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. По теме диссертации опубликовано 3 научные статьи 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ современного состояния электробезопасности на горных предприятиях.

Горнодобывающая промышленность характеризуется высокой энерго- и трудоемкостью технологических процессов и занимает особое место среди других отраслей промышленности в связи с особыми специфическими условиями производства (среди них наиболее важны микроклимат, освещенность, шум и вибрация, трудные условия горных работ), оказывающими влияние на состояние производственного травматизма, в том числе электротравматизма.

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.

На рисунке 1 представлена динамика летального электротравматизма за период с 2004 по 2016 годы.

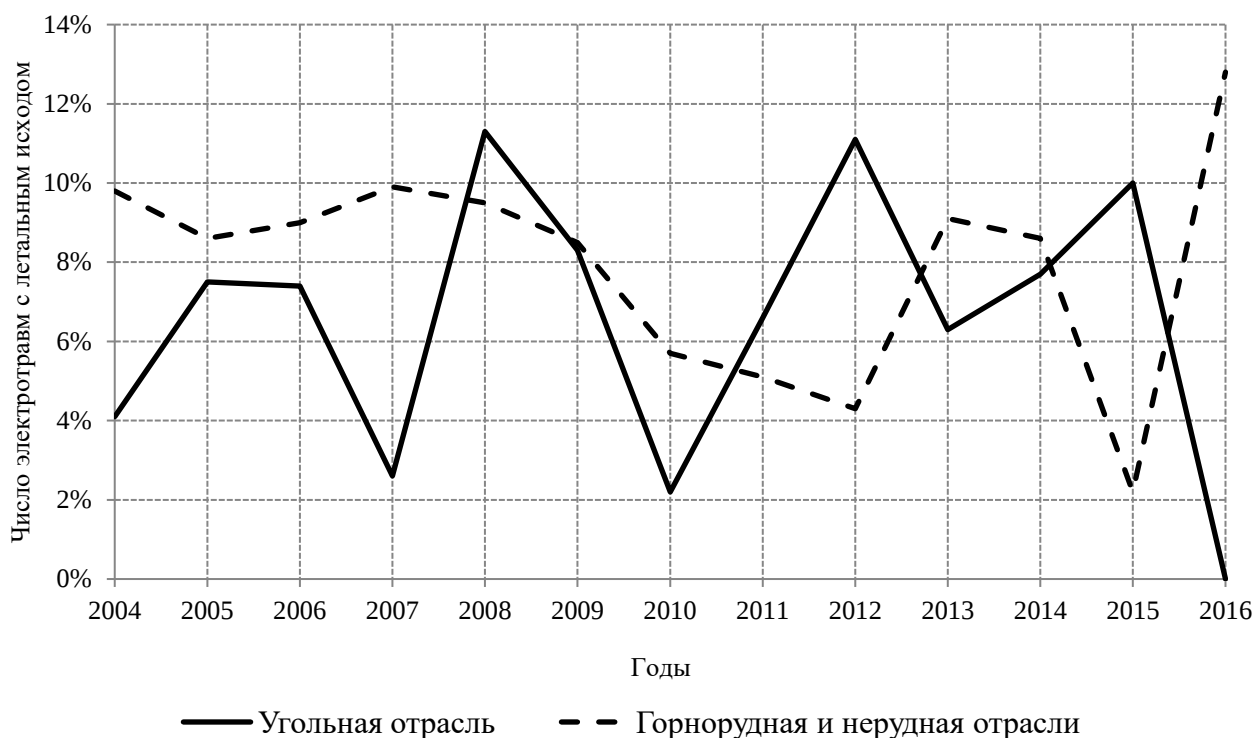


Рисунок 1 – Динамика летального электротравматизма на горных предприятиях (в % от общего травматизма с летальным исходом)

Для предприятий угольной отрасли тенденция летального электротравматизма 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 %).

По причинам возникновения все случаи электротравмирования подразделяются на 2 группы: первая группа – прикосновение непосредственно к токоведущим частям (прямое прикосновение); вторая группа – прикосновение к открытым проводящим частям, которые вследствие аварийных режимов работы электроустановки могут оказаться под напряжением (косвенное прикосновение).

На рисунке 2 представлены диаграммы, показывающие распределения причин электротравматизма на предприятиях угольной, рудной и нерудной отраслей.

Выполненный анализ электротравматизма на горных предприятиях за период с 2004 по 2016 годы 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).

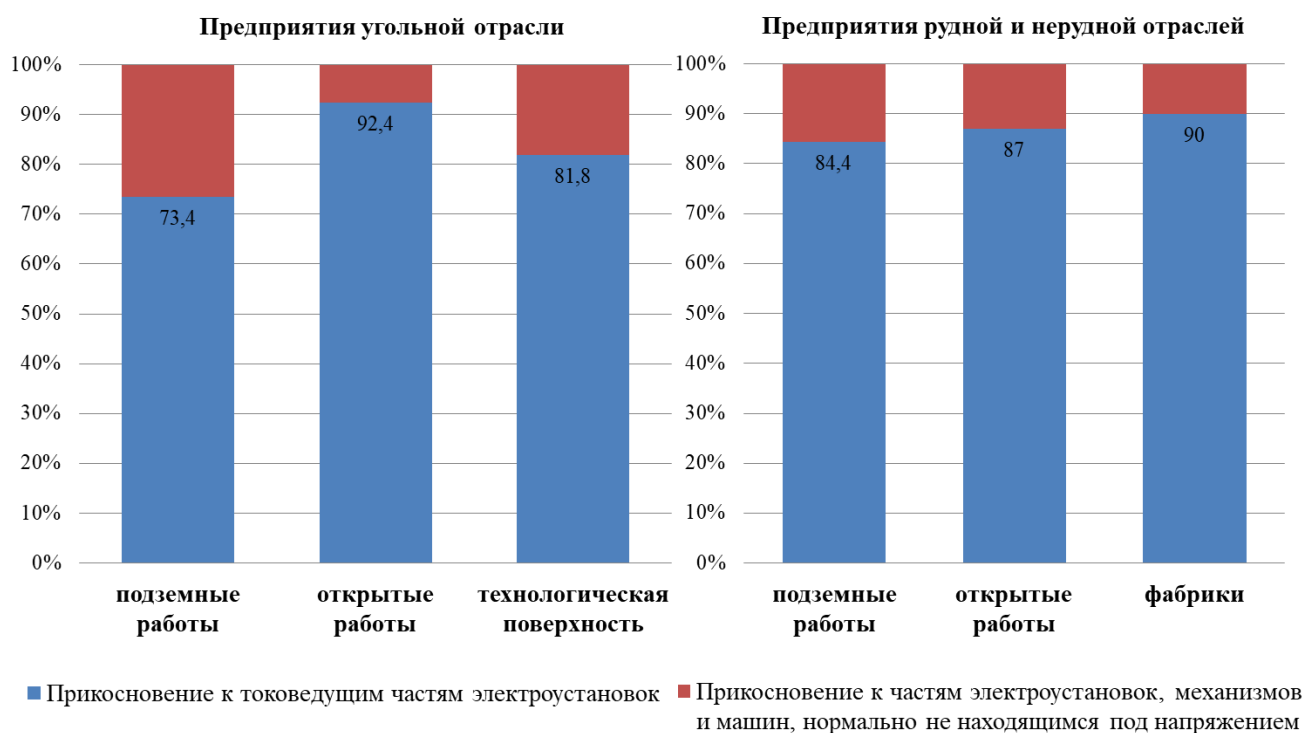


Рисунок 2 – Причины электротравматизма на предприятиях горных отраслей

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 проведенного анализа современного состояния электробезопасности на горных предприятиях сформулированы задачи исследования.

Во второй главе разработана методика исследования электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

Электробезопасность представляет собой трехэлементную систему: «человек – рабочая среда – электроустановка». Подземные электрические сети являются одним из основных источников электротравм, поэтому целесообразно провести исследование электробезопасности в указанных сетях с учетом влияния всех элементов трехэлементной системы.

Методика исследования электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий разработана в соответствии с методическими принципами исследования электробезопасности, среди которых: необходимость наличия массово-типичных данных и их критическая оценка для статистического исследования; необходимость учета факторов, характеризующих воздействие тока на организм человека (величины тока, продолжительности

его воздействия, пути тока через тело человека, сопротивления тела человека и др.); необходимость учета условий поражения человека электрическим током, связанных со схемами включения человека в электроустановку.

С учетом вышеизложенного методика исследования электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий включает:

1. Методика исследования параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий, которая заключается в определении статистических характеристик и моделировании вероятностных законов распределения 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 (R), емкостного (X), полного (Z) сопротивления и емкости относительно земли (C) угольных шахт и рудников различных горнопромышленных районов страны.

В результате первичной обработки статистической информации требуется получить интервальные вариационные ряды параметров изоляции подземных электрических сетей и с применением методов теории вероятности и математической статистики определить их статистические характеристики: средневзвешенное значение, дисперсию, стандартное отклонение, медиану, интерквартильный размах.

На основе полученных статистических характеристик необходимо построить диаграммы размаха параметров изоляции, визуальная оценка которых позволит выдвинуть гипотезы о принадлежности параметров изоляции законам распределения и определить его параметры.

Выдвигаются гипотезы, согласно которым параметры изоляции подземных электрических сетей могут описываться логнормальным

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

или гамма-законом распределения случайной величины

$$f(x) = x^{\alpha-1} \cdot \frac{e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^{\alpha}\Gamma(\alpha)}, \quad (2)$$

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

После определения с использованием метода моментов параметров экспериментальных законов распределения (μ и σ^2 для логнормального закона распределения, α и β для гамма-закона распределения) необходимо выполнить моделирование теоретических значений вариационных рядов параметров изоляции и емкости подземных электрических сетей горных предприятий с применением метода Монте-Карло.

Установление закона распределения параметров изоляции подземных электрических сетей необходимо выполнять с применением критериев согласия Пирсона и Колмогорова-Смирнова. Для этого определяются наблюдаемые значения критериев – $\chi_{\text{набл}}^2$ и $K_{\text{набл}}$, и сравниваются с критическими значениями критериев при принятом уровне значимости в 5% – $\chi_{0,05}^2$ и $K_{0,05}$. Если выполняется система неравенств

$$\begin{cases} \chi_{\text{набл}}^2 \leq \chi_{0,05}^2; \\ K_{\text{набл}} \leq K_{0,05}; \\ K_{\text{Лнабл}} < K_{\text{Гнабл}}, \end{cases} \quad (3)$$

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

параметров изоляции соответствует логнормальному закону распределения. Если система (3) не выполняется, то распределение параметров изоляции соответствует гамма-закону.

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 (математическое ожидание ($M(x)$), дисперсия ($D(x)$), стандартное отклонение ($\sigma(x)$), коэффициент асимметрии (A_s), коэффициент эксцесса (E_k)).

2. Методика исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, включающая исследование условий электробезопасности при прикосновении к токоведущим частям электроустановок (прямое прикосновение) и к нетокведущим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением (косвенное прикосновение).

Для исследования влияния параметров изоляции электроустановки 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 (прямое прикосновение).

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 .

Выражение (4) 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):

$$Z_{\min} = \frac{3[U - I_{\text{ч доп}}(R_{\text{ч}} + R_{\text{пер}})]}{I_{\text{ч доп}}}, \text{ кОм}, \quad (4)$$

где U – фазное напряжение сети, В; $R_{\text{ч}}$ – сопротивление тела человека, кОм; $R_{\text{пер}}$ – переходное сопротивление, кОм.

Используя величину минимального значения полного сопротивления изоляции, определенного с использованием выражения (4), и выражения функций распределения полного сопротивления изоляции $F(Z)$, определяются уровни обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий, при которых условия электробезопасности не обеспечиваются:

$$F_{\text{н0}}(Z) < F(Z_{\min}), \quad (5)$$

где $F_{\text{н0}}(Z)$ – значение функции распределения для величин $Z < Z_{\min}$; $F(Z_{\min})$ – значение функции распределения для величины $Z_{\min}$.

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

$$F_0(Z) \geq F(Z_{\min}), \quad (6)$$

где $F_0(Z)$ – значение функции распределения для величин $Z \geq Z_{\min}$.

Уровни обеспечения электробезопасности, вычисленные с использованием выражения (6), 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, определив при этом закономерности между ними. 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} .

Зависимость между активным и емкостным сопротивлениями изоляции в общем виде представляется выражением уравнением линейной регрессии:

$$X = b_0 + b_1 R, \quad (7)$$

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

Выражение (7) характеризует связь между активным и емкостным сопротивлениями изоляции подземных электрических сетей горных предприятий.

Необходимо провести анализ полученных зависимостей, а именно: качественную оценку коэффициентов корреляции (r_{RX}) и детерминации (R^2), математической точности зависимостей (A); оценку статистической значимости коэффициентов корреляции (r_{RX}), зависимостей в целом (F-критерий Фишера) и их параметров b_0 и b_1 (t-критерий Стьюдента).

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:

$$I_{\text{ч}} = \frac{U}{R_{\text{ч}} \sqrt{1 + \frac{R \cdot (R + 6R_{\text{ч}})}{9R_{\text{ч}}^2 \cdot \left(1 + \frac{R^2}{(b_0 + b_1 R)^2}\right)}}}, \text{ мА.} \quad (8)$$

Зависимость тока (8), 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 (Z_{min}) и активного (R_{min}) сопротивлений

$$C_{max} = \frac{10^3}{\omega X_{min}}, \text{ мкФ,} \quad (9)$$

где $\omega = 2\pi f$ – угловая частота, рад/с; $X_{min} = \frac{R_{min} Z_{min}}{R_{min} - Z_{min}}$ – минимальное значение емкостного сопротивления изоляции, кОм.

Выражение (9) 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.

При косвенном прикосновении к заземленным нетоковедущим частям электроустановки в сети с изолированной нейтралью 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.

Выражение для определения тока, протекающего через тело человека при косвенном прикосновении в сети с изолированной нейтралью, имеет вид:

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

где R_3 – сопротивление заземляющего устройства, Ом; $\alpha_1 = 1 - \frac{\varphi_{\text{н}}}{\varphi_{\text{р}}}$ – коэффициент напряжения прикосновения; $\varphi_{\text{н}}$ – потенциал ног, В; $\varphi_{\text{р}}$ – потенциал рук, В; $\alpha_2 = \frac{R_{\text{ч}}}{R_{\text{ч}} + r_{\text{п}} + r_{\text{об}}}$ – коэффициент сопротивления цепи тока через тело человека; $r_{\text{п}}$ – сопротивление опорной поверхности (пола), кОм; $r_{\text{об}}$ – сопротивление обуви, кОм.

Выражение (10) позволяет определить ток, протекающий через тело человека, при косвенном прикосновении в подземных электрических сетях горных предприятий, который 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 (10), должно сравниваться с длительно допустимым безопасным значением тока ($I_{\text{ч д.д.оп}}$) с целью выработки рекомендаций по обеспечению условий безопасности в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников горных предприятий.

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.

В третьей главе выполнено исследование состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий.

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

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»).

На рисунке 3 представлена блок-схема исследования состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий. Представленная на рисунке блок-схема разработана в соответствии с изложенной методикой исследования параметров изоляции подземных электрических сетей горных предприятий и 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.

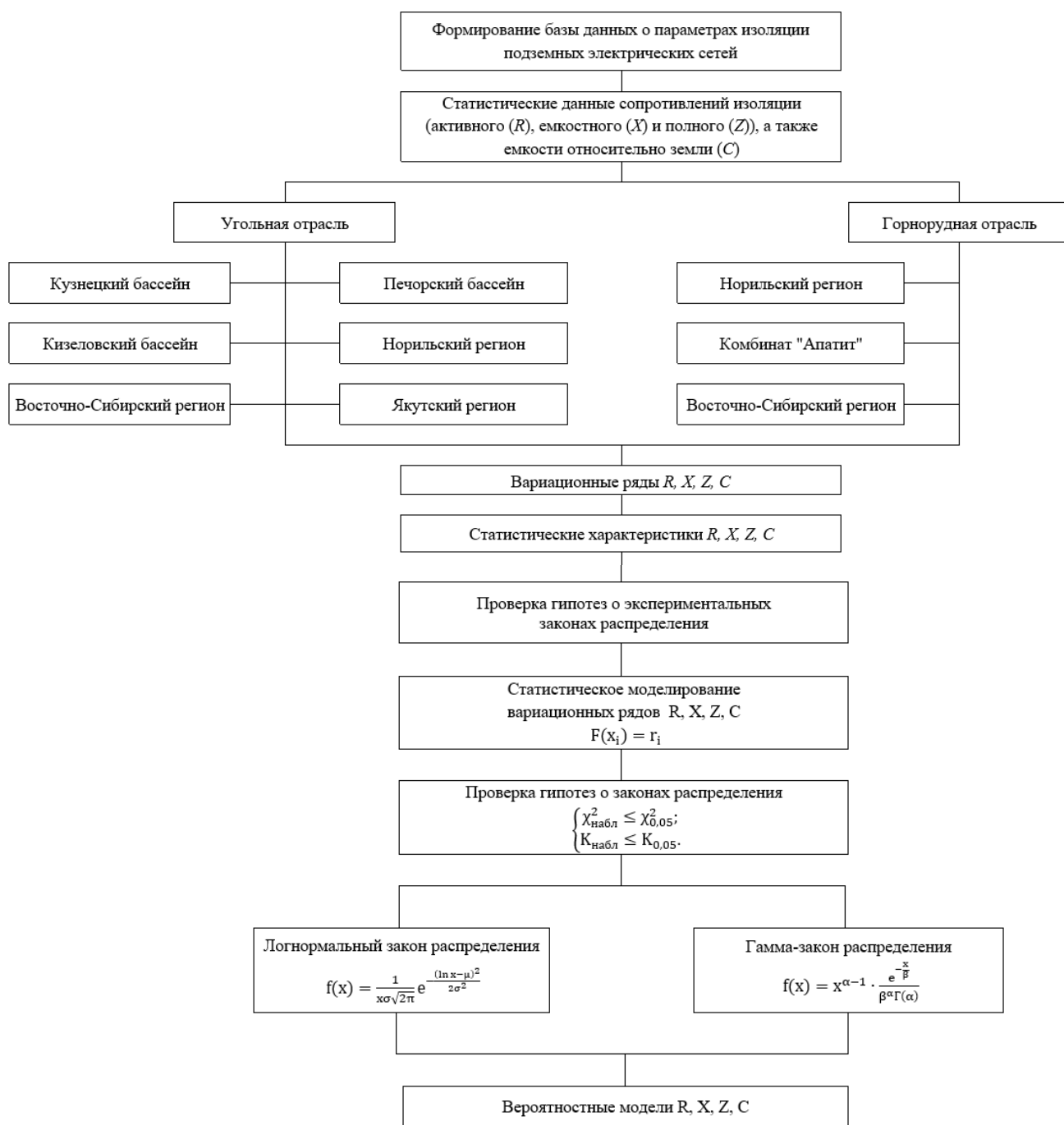


Рисунок 3 – Блок-схема исследования состояния изоляции подземных электрических сетей горных предприятий

В настоящей главе обобщен и представлен статистический материал по характеристикам активного, емкостного, полного сопротивлений изоляции и емкости подземных электрических сетей относительно земли для: угольных шахт Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов; рудников Норильского и Восточно-Сибирского регионов и комбината «Апатит».

Распределения вероятностей 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.

В таблице 1 представлены полученные впервые вероятностные законы распределения параметров изоляции подземных электрических сетей угольных шахт предприятий Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов и рудничных подземных электрических сетей Норильского и Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит».

Полученные 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.

В четвертой главе выполнено исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях выполнено в условиях: угольных шахт Кузнецкого, Печорского, Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов; рудников Норильского и Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит». Сопротивление изоляции является важнейшим защитным средством в сетях с изолированной нейтралью угольных шахт и рудников, поэтому определены уровни обеспечения условий электробезопасности, которые обеспечиваются состоянием сопротивления изоляции подземных электрических сетей – значения вероятности (уровень), при котором полное сопротивление изоляции сети, определенное по выражению (4) при необходимых условиях возникновения электротравмы ($r_{\Pi} = 0, r_{об} = 0$), обеспечивает ток, не превышающий $I_{ч доп}$ при времени воздействия 0,2 с.

Вероятностные уровни обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт Кузнецкого, Печорского и Кизеловского бассейнов, Норильского, Восточно-Сибирского и Якутского регионов, а также рудников Норильского и Восточно-Сибирского регионов, комбината «Апатит», приведены в таблице 2.

Анализ данных о вероятностных уровнях обеспечения электробезопасности (таблица 2) позволил 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 находятся в диапазоне 77,6-90,4%, для рудников – в диапазоне 61,3-89,6%.
3. Для повышения условий электробезопасности в подземных выработках угольных шахт и рудников необходимо обеспечить повышение значения полного сопротивления изоляции электрических сетей до минимального значения, равного 0,92 кОм.

В рамках трехэлементной системы электробезопасности оценена зависимость поражающего фактора (тока через человека при его прикосновении к фазному проводнику) от активного и емкостного сопротивлений изоляции подземных электрических сетей. При этом определены зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников (таблица 3).

Таблица 1 – Законы плотности распределения вероятности параметров изоляции, а также емкости подземных электрических сетей горных предприятий

Горнопромышленный район	Закон распределения параметров изоляции подземных электрических сетей			
	Активное сопротивление	Емкостное сопротивление	Полное сопротивление	Емкость
Предприятия угольной отрасли				
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	$f(R) = R^{1,41} \cdot \frac{e^{-\frac{R}{3,27}}}{21,73}$	$f(X) = \frac{1}{1,33 \cdot X} e^{-\frac{(\ln X - 1,29)^2}{0,56}}$	$f(Z) = \frac{1}{1,15 \cdot Z} e^{-\frac{(\ln Z - 1,16)^2}{0,42}}$	$f(C) = \frac{1}{C} e^{-\frac{(\ln C + 0,32)^2}{0,32}}$
Предприятия горнорудной отрасли				
Норильский регион	$f(R) = \frac{1}{1,25 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 2,04)^2}{0,5}}$	$f(X) = \frac{1}{1,7 \cdot X} e^{-\frac{(\ln X - 1)^2}{0,92}}$	$f(Z) = Z^{1,2} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{1,4}}}{2,31}$	$f(C) = C^{1,77} \cdot \frac{e^{-\frac{C}{0,49}}}{0,23}$
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	$f(R) = \frac{1}{1,68 \cdot R} e^{-\frac{(\ln R - 1,48)^2}{0,9}}$	$f(X) = X^{1,15} \cdot \frac{e^{-\frac{X}{2,96}}}{11,03}$	$f(Z) = Z^{0,44} \cdot \frac{e^{-\frac{Z}{3,36}}}{5,1}$	$f(C) = \frac{1}{2,24 \cdot C} e^{-\frac{(\ln C + 0,61)^2}{1,6}}$

Таблица 2 – Уровни обеспечения условий электробезопасности в подземных электрических сетях угольных шахт

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

Таблица 3 – Зависимости емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников

Горнопромышленный район	Зависимость $X = f(R)$	r_{RX}	Качественная оценка тесноты связи	R^2	A, %	Качественная оценка математической точности
Угольная отрасль						
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
Горнорудная отрасль						
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

Анализ зависимостей емкостного сопротивления от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей угольных шахт и рудников показал, что:

1. Коэффициенты парной линейной корреляции зависимостей 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 не превышает значения 10%, что свидетельствует о высокой математической точности полученных уравнений. Качественная оценка математической точности зависимости для подземных электрических сетей угольных шахт Норильского региона принимается удовлетворительной.

Положительная 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 подтверждается положительными результатами проверок ($t_{расч} > t_{табл}$, $F_{расч} > F_{табл}$, $t_{b_0} > t_{b_{табл}}$, $t_{b_1} > t_{b_{табл}}$). Полученные зависимости $X = f(R)$ признаны математически и статистически значимыми и использованы для дальнейшего исследования условий электробезопасности в подземных электрических сетях рассматриваемых регионов.

Подстановка полученных зависимостей $X = f(R)$ в выражение (8) позволила получить выражения для тока через человека в зависимости только от активного сопротивления изоляции подземных электрических сетей для подземных электрических сетей рассматриваемых горнопромышленных районов, из которых определены минимальные значения активного сопротивления изоляции R_{min} , определяющие границу областей обеспечения условий электробезопасности.

В таблице 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 – Значения минимального активного и емкостного сопротивлений изоляции, максимально допустимой емкости подземных электрических сетей угольных шахт и рудников

Горнопромышленный район	R_{min} , кОм	X_{min} , кОм	C_{max} , мкФ
Угольная отрасль			
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
Горнорудная отрасль			
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 данных позволил отметить, что для подземных электрических сетей как угольных шахт, так рудников рассматриваемых регионов максимальное значение емкости сети (C_{max}) превышает допустимое по условиям электробезопасности значение, равное 1 мкФ, следовательно, для обеспечения условий электробезопасности и выполнения требований нормативных документов в подземных электрических сетях угольных шахт и рудников рассматриваемых горнопромышленных районов необходимо применять устройства компенсации емкостных токов утечки.

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 .

В пятой главе разработаны рекомендации по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий.

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.

Алгоритм оценки условий электробезопасности приведен на схеме рисунка 4. Разработанный алгоритм позволяет 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.

Реализация алгоритма оценки условий электробезопасности, разработанная в программном комплексе Microsoft Office Excel, 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.

В числе рекомендаций по повышению условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий следует использовать:

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.

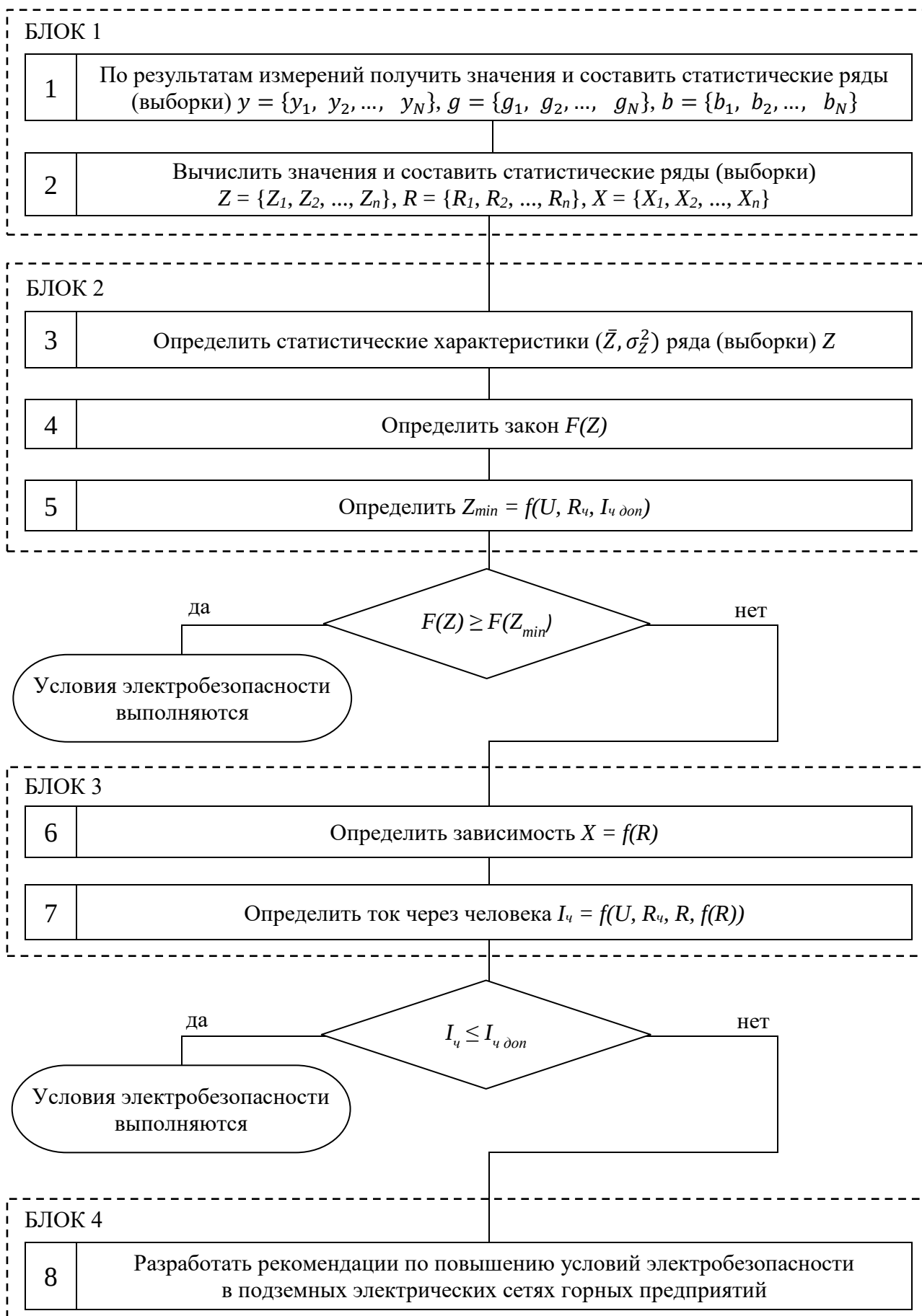


Рисунок 4 – Алгоритм оценки условий электробезопасности

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе получены следующие основные результаты:

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 отраслей (предприятия Норильского региона и Восточной Сибири, а также комбинат «Апатит»). 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.

Основное содержание работы отражено в следующих публикациях:

Научные работы, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Кутепов А.Г., Ляхомский А.В. Анализ электротравматизма на предприятиях горной отрасли // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2018. - №S7. - С. 3-9.

2. Кутепов А.Г., Ляхомский А.В. Вероятностные модели параметров изоляции подземных электрических сетей для исследования условий электробезопасности // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2018. - №S7. - С. 10-20.

3. Кутепов А.Г., Ляхомский А.В. Исследование условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). - 2018. - №S7. - С. 21-33.

Личный вклад соискателя. Основные положения диссертации получены лично автором. В работах, написанных в соавторстве, вклад автора заключается в следующем: анализ электротравматизма на предприятиях горной отрасли, разработка методических положений исследования, исследование состояния изоляции и условий электробезопасности в подземных электрических сетях горных предприятий, разработка алгоритма оценки условий электробезопасности и его программная реализация.