

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт

Электроэнергетики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ В.И. Пантелеев
подпись инициалы, фамилия
« ____ » _____ 2023г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Применение меры неопределенности информации в оценке структурной
надежности сетей и подстанций

наименование темы

13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель	_____	<u>доц. каф ЭМиАТ, к.э.н.</u>	<u>Н. В. Дулесова</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Выпускник	_____		<u>И. В. Комиссарова</u>
	подпись, дата		инициалы, фамилия
Рецензент	_____	<u>Замдиректора по научной работе ИТИ ХГУ им. Н. Ф. Катанова, канд. техн. наук</u>	<u>Д.Ю.Карандеев</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____	<u>доц. каф ЭМиАТ, к.т.н.</u>	<u>А. В. Коловский</u>
	подпись, дата	должность, ученая степень	инициалы, фамилия

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Хакасский технический институт – филиал ФГАОУ ВО «Сибирский федераль-
ный университет»
институт

Электроэнергетика
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ Ч. Н. Чистяков
подпись инициалы, фамилия
«29» сентября 2021 г.

**ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме магистерской диссертации**

Студенту Комиссаровой Ирине Валентиновне

фамилия, имя, отчество

Группа ОЗХЭн 20–01 Направление (специальность) 13.04.02.

номер

код

«Электроэнергетика и электротехника»

полное наименование

Тема выпускной квалификационной работы Применение меры неопределенности информации в оценке структурной надежности сетей и подстанций

Утверждена приказом по университету №752 от 20.10.2020г.

Руководитель ВКР Н. В. Дулесова, доцент кафедры «Электроэнергетика», к.э.н.

инициалы, фамилия, должность, ученое звание и место работы

Исходные данные для ВКР: усредненные значения параметров надежности оборудования подстанций, общее количество отключений одноименного оборудования подстанций на 5 лет.

Перечень разделов ВКР:

Введение

- 1 Теоретическая часть
 - 1.1 Структурная надежность сетей и подстанций
 - 1.2 Критерии оценки структурной надежности
 - 1.3 Методы анализа надежности
 - 1.4 Мера неопределенность информации
- 2 Аналитическая часть
 - 2.1 Показатели надежности сетей и подстанций
 - 2.2 Анализ исходных данных
- 3 Аналитическая часть
 - 3.1 Анализ выполненных расчетов
 - 3.2 Выводы по работе

Заключение

Список использованных источников

Руководитель ВКР

подпись

Н. В. Дулесова

инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению

подпись,

И. В. Комиссарова

инициалы и фамилия студента

«29» сентября 2021 г.

РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Применение меры неопределенности информации в оценке структурной надежности сетей и подстанций» содержит 56 страниц текстового документа, 14 таблиц, 25 использованных источников.

СТРУКТУРНАЯ НАДЕЖНОСТЬ, МЕРА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ИНФОРМАЦИИ, ОТКАЗ, ЭНТРОПИЯ

Объект исследования – структурная надежность сетей и подстанций.

Предмет исследования – методы, способы и информационные технологии определения показателей структурной надежности.

Методы исследования – обработка статистической информации с помощью методов компьютерного моделирования, математической статистики и информационных технологий с визуализацией.

Цель данной работы является создание инструмента оценки структурной надежности сетей и подстанций на основе применения меры неопределенности информации.

Научная новизна работы заключается в разработке новых подходов, методов и технологий, позволяющих эффективно работать с информацией в условиях неопределенности, что имеет большое значение в современном мире, где данные играют все более важную роль во многих областях, в том числе и обеспечении надежности электроснабжения.

Практическая значимость исследований – работы заключается в том, что она может быть предложена электросетевым организациям как методика оценки и разработки мероприятий по повышению надежности электрических сетей.

THE ABSTRACT

The final qualifying work on the topic “Application of information uncertainty measures in assessing the structural reliability of networks and substations” contains 56 pages of text document, 14 tables, 25 sources used.

STRUCTURAL RELIABILITY, MEASURE OF INFORMATION UNCERTAINTY, FAILURE, ENTROPY

The object of study is the structural reliability of networks and substations.

The subject of the research is methods, methods and information technologies for determining indicators of structural reliability.

Research methods - processing of statistical information using computer modeling methods, mathematical statistics and information technologies with visualization.

The purpose of this work is to create a tool for assessing the structural reliability of networks and substations based on the application of a measure of information uncertainty.

The purpose of this work is to create a tool for assessing the structural reliability of networks and substations based on the application of a measure of information uncertainty.

The scientific novelty of the work lies in the development of new approaches, methods and technologies that make it possible to effectively work with information under conditions of uncertainty, which is of great importance in the modern world, where data plays an increasingly important role in many areas, including ensuring the reliability of power supply .

The practical significance of the research and work lies in the fact that it can be offered to electric grid organizations as a methodology for assessing and developing measures to improve the reliability of electric networks.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	7
1 Теоретическая часть.....	10
1.1 Структурная надежность сетей и подстанций	10
1.2 Критерии оценки структурной надежности	11
1.3 Методы анализа надежности	13
1.4 Мера неопределенность информации.....	22
2 Аналитическая часть.....	24
2.1 Показатели надежности сетей и подстанций	24
2.2 Анализ исходных данных.....	27
3 Аналитическая часть.....	43
3.1 Анализ выполненных расчетов	43
3.2 Выводы по работе	50
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	52
СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ.....	53
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	54

ВВЕДЕНИЕ

Вопрос надежности электроснабжения является ключевым в развитии электроэнергетики на протяжении многих лет.

От надёжности электроснабжения зависят как показатели качества электроэнергии, непрерывность ее передачи, экономические показатели работы оборудования, так и величина ущерба от перерывов работы электрических сетей. Многие ученые рассматривали эту проблему. Тем не менее, до настоящего времени не найден универсальный подход повышения надежности и оценки ее составляющих.

Таким образом, сложилась проблемная ситуация: несмотря на большое количество разработок и научных исследований по данной тематике, надежность электроснабжения сохраняется на низком уровне, что связано, с одной стороны, с экономической ситуацией, а с другой – не адаптированными для потребителей предложениями по повышению надежности.

Актуальность работы заключается в необходимости оценить уровень надежности элементов электрических сетей и подстанций. Состояние элементов характеризуется рядом показателей надежности, то есть на их основе можно судить о том, насколько сеть адаптирована к внешним условиям и внутреннему управлению. С точки зрения управления процессами в сетях оценка надежности относится к задаче кибернетики. С другой стороны, вопросы состояния энергосистемы связаны с синергетикой. Связь этих научных направлений достигается за счет применения теории информации, в которой значимое место имеет неопределенность информации. Измерение неопределенности через ее меру позволяет оценить изменяющееся состояние электроэнергетической системы под воздействием нежелательных факторов вероятностной природы.

Степень разработанности проблемы. Исследованию надежности электротехнических комплексов и систем электроснабжения посвящено большое количество научных работ таких авторов, как Арзамасцев Д.А., Аллан Р., Биллinton Р., Воропай Н.И., Гук Ю.Б., Зорин В.В., Казак Н.А., Китушин В.Г., Куд-

рин Б.И., Лосев Э.А., Мясников А.В., Недин И.В., Обоскалов В.П., Розанов М.Н., Руденко Ю.Н., Рябинин И.А., Синьчугов Ф.И., Тисленко В.В., Фокин Ю.А., Эндрени Дж., Ушаков И.А. и др. В научных трудах указанных авторов представлены различные методики определения надежности электротехнических комплексов и систем электроснабжения. Работы ученых, которые упомянуты выше, позволили изучить, обобщить и сделать выводы о степени важности проблемы, которую они поднимают в своих научных работах.

Целью работы является создание инструмента оценки структурной надежности сетей и подстанций на основе применения меры неопределенности информации (энтропии).

Для достижения поставленной цели решались следующие задачи:

- обозначить проблематику исследования, связанную с оценкой структурной надежности;
- выполнить поиск и изучение литературных источников по теме исследования;
- выполнить анализ существующих методов и методик определения показателей структурной надежности;
- создать инструмент оценки структурной надежности сетей и подстанций;
- апробировать методику на примере реальной сети.

Объект исследования является структурная надежность сетей и подстанций.

Предметом исследования являются методы, способы и информационные технологии определения показателей структурной надежности.

Практическая значимость работы заключается в том, что она может быть предложена электросетевым организациям как методика оценки и разработки мероприятий по повышению надежности электрических сетей.

Апробация работы. Основные результаты были представлены в 2022 году на XVIII Международной конференции студентов, аспирантов и молодых

ученых «Перспект свободный – 2022», посвященной Международному году фундаментальных наук в интересах устойчивого развития. Докладчик награжден сертификатом заочного участия. В 2023 году на XIX Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспект свободный – 2023». Докладчик награжден сертификатом заочного участия.

Структура и объем работы. Работа состоит из трех разделов: теоретическая, аналитическая и практическая часть. Объем работы составляет 56 страниц.

1 Теоретическая часть

1.1 Структурная надежность сетей и подстанций

Структурная надежность подстанций – это мера их способности сохранять работоспособность и безопасность в условиях различных внешних воздействий, таких как сильные ветры, землетрясения, пожары и т.д. [15]

Состояние объекта, при котором он способен выполнять заданные функции, сохраняя значения основных параметров в пределах, установленных нормативно-технической документацией, называют работоспособностью, а состояние, в котором объект удовлетворяет указанным требованиям, – его исправностью. Событие, заключающееся в нарушении работоспособности объекта, называют отказом. В зависимости от назначения объекта, выполняемых им функций и условий эксплуатации различают несколько свойств объекта, связанных с надежностью. К этим свойствам относятся:

- безотказность (свойство непрерывно сохранять работоспособность);
- долговечность (свойство сохранять работоспособность до определенного состояния);
- ремонтпригодность (возможность выполнения ремонта и технического обслуживания);
- восстанавливаемость (возможность восстановления работоспособности после отказа);
- срок службы или сохраняемость [12].

Для сложных многофункциональных систем, состоящих из элементов разнородных по своим свойствам, показателям надежности, назначению, дате изготовления, сроку ввода в эксплуатацию и т. п., можно выделить два основных аспекта надежности, которые условимся называть аппаратурным и структурным.

Под аппаратным аспектом будем понимать проблему надежности аппаратуры, отдельных устройств и их элементов, входящих в узлы и линии сети.

Структурный аспект отражает функционирование сети в зависимости от работоспособности или отказов узлов, или линий. Надежность сети в этом случае будем называть структурной надежностью.

Для обеспечения структурной надежности применяются различные меры и технологии:

1. Подстанции должны быть построены из прочных материалов и иметь устойчивую конструкцию, способную выдерживать механические нагрузки и воздействия.

2. Подстанции должны быть оборудованы системами пожаротушения и предотвращения возгорания, а также иметь огнестойкую конструкцию.

3. Подстанции должны быть оборудованы системами защиты от перенапряжений, чтобы предотвратить повреждение оборудования и обеспечить безопасность персонала.

4. Подстанции должны иметь резервные системы и оборудование, чтобы обеспечить непрерывность электроснабжения в случае отказа основных систем.

5. Регулярное обслуживание и проверка: Подстанции должны регулярно проходить обслуживание и проверку, чтобы выявлять и устранять потенциальные проблемы и повреждения.[8, 10]

Структурная надежность подстанций является важным аспектом энергетической инфраструктуры, поскольку от нее зависит надежность и безопасность электроснабжения.

1.2 Критерии оценки структурной надежности

Критерии оценки структурной надежности сетей и подстанций могут включать:

1. Надежность электроснабжения. Этот критерий оценивает способность сети или подстанции обеспечить непрерывное электроснабжение потребителей. Он может включать в себя такие показатели, как частота и длительность отключений, среднее время восстановления после отключения и т. д.

2. Устойчивость к отказам. Этот критерий оценивает способность сети или подстанции сохранять работоспособность при возникновении отказов в отдельных элементах. Он может включать в себя такие показатели, как количество и типы резервных элементов, время восстановления после отказа и т. д.

3. Емкость и масштабируемость. Этот критерий оценивает способность сети или подстанции справиться с ростом нагрузки и добавлением новых потребителей. Он может включать в себя такие показатели, как максимальная пропускная способность, запас мощности, возможность расширения и т. д.

4. Безопасность. Этот критерий оценивает способность сети или подстанции предотвращать аварии и минимизировать риски для персонала и окружающей среды. Он может включать в себя такие показатели, как наличие систем автоматического отключения при опасных ситуациях, соответствие нормам безопасности, наличие систем пожарной безопасности и т. д.

5. Экономическая эффективность. Этот критерий оценивает соотношение между затратами на строительство и обслуживание сети или подстанции и их надежностью. Он может включать в себя такие показатели, как стоимость инвестиций, операционные расходы, стоимость энергии и т. д.

6. Гибкость и адаптивность: Этот критерий оценивает способность сети или подстанции приспосабливаться к изменяющимся условиям и требованиям. Он может включать в себя такие показатели, как возможность переключения на альтернативные источники энергии, возможность изменения конфигурации сети, использование умных сетей и т.д. [21, 22]

В зависимости от конкретных целей и требований, специалисты могут использовать различные комбинации этих критериев для оценки структурной надежности сетей и подстанций.

1.3 Методы анализа надежности

Под надежностью понимается свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

Методы анализа надежности можно разделить на 2 основные группы:

- основные методы анализа надежности;
- общие технические методы, которые могут быть использованы как вспомогательные при проведении анализа надежности, а также при проектировании надежности.

Методы анализа надежности, используемые для решения общих задач анализа надежности, следующие:

- прогнозирование интенсивности отказов (является методом, который применяют главным образом на ранних стадиях проектирования для оценки интенсивности отказов оборудования и системы);

- анализ дерева неисправностей – это метод идентификации и анализа факторов, которые могут способствовать наступлению некоторого нежелательного события (называемого конечным событием – “top event”). Факторы-причины определяются дедуктивным способом, логически выстраиваются и представляются графически в виде диаграммы-дерева, которая изображает связь факторов-причин с основным событием;

- анализ дерева событий – графический метод представления взаимоисключающих последовательностей событий, следующих за появлением исходного события, в соответствии с функционированием и не функционированием систем, разработанных для смягчения последствий опасного события. Метод ЕТА может быть применен для качественной и/или количественной оценки;

- анализ структурной схемы надежности (RBD) – является графическим изображением представления логической схемы системы через подсистемы

и/или компоненты и позволяет изобразить пути успеха работоспособности системы в виде логических связей подсистем и компонентов;

– Марковский анализ – применим в ситуации, когда будущее состояние системы зависит только от ее текущего состояния. Данный метод обычно используют для анализа ремонтпригодных систем, которые могут работать во многих режимах, и в ситуациях, когда применение анализа надежности отдельных блоков системы нецелесообразно;

– анализ сети Петри – графический метод представления и анализа сложных логических взаимодействий компонентов или событий в системе. Сеть Петри отражает такие сложные взаимодействия как конкуренция, конфликт, синхронизация, взаимное исключение и ограничение ресурса;

– анализ режимов и последствий (критичности) отказов FME(C)A – ранжирует идентифицированные виды отказов в порядке их важности (критичности) посредством вычисления одного из двух показателей – числа приоритетности риска или критичности отказа;

– исследование HAZOP является методом идентификации опасностей и риска для людей, оборудования, окружающей среды и/или достижения целей организации. От группы исследования HAZOP обычно ожидают по возможности конкретных решений по обработке риска;

– анализ человеческого фактора (HRA – Human Reliability Assessment) – метод, применяемый для оценки влияния действий человека, в том числе ошибок оператора, на работу системы;

– анализ прочности и напряжений определяет способность компонента или элемента противостоять электрическим и механическим воздействиям окружающей среды или другим напряжениям, которые могут быть причиной отказа. Этот анализ определяет физические последствия воздействия на компоненты, а также механические или физические свойства компонента. Вероятность отказа компонента прямо пропорциональна прикладываемым напряже-

ниям. Определенные отношения напряжений к прочности компонента определяют надежность компонента;

- таблица истинности (анализ функциональной структуры): метод заключается в составлении списка всех возможных комбинаций состояний (работоспособное состояние, неработоспособное состояние) компонентов системы и изучении их последствий;

- статистические методы надежности могут быть использованы для определения количественной оценки показателей безотказности.

Общие технические методы обычно включают:

- исследование ремонтпригодности;
- анализ паразитных контуров схемы;
- анализ наихудшего случая;
- имитационное моделирование отклонений;
- разработку программного обеспечения по надежности;
- анализ конечных элементов;
- ограничение допустимых значений и выбор частей;
- анализ Парето;
- диаграмму причин и следствий;
- анализ отчета об отказах и систему корректирующих действий.

Следующие методы не выделены как самостоятельные, так как они являются модификацией упомянутых выше методов анализа надежности:

- анализ причин/следствий – комбинация ЕТА и FТА;
- динамический FТА-расширение FТА, когда некоторые события представляются при помощи Марковских моделей;
- функциональный анализ отказов – специальный вид FМЕА;
- двоичные диаграммы решений, используемые главным образом для эффективного построения дерева неисправностей.

Методы анализа надежности классифицируют в соответствии с их главной целью по следующим категориям:

- 1) Методы для предотвращения отказов и неисправностей, например,
 - ограничение допустимых значений и выбор частей;
 - анализ прочности – напряжений.

2) Методы анализа архитектуры системы и распределения надежности.

2а) Восходящие методы, главным образом направленные на исследования последствий единичных неисправностей:

- анализ дерева событий (ETA);
- анализ видов и последствий отказов (FMEA),
- исследование опасности и удобства использования (HAZOP).

Начальным этапом любого восходящего метода является идентификация режимов отказов на соответствующем уровне. Для каждого режима отказа определяют его влияние на эффективность системы. Восходящий метод анализа надежности позволяет четко идентифицировать все режимы одиночных отказов, поскольку он опирается на списки частей системы или другие контрольные списки. На начальных этапах разработки анализ может быть качественным и иметь дело с функциональными отказами. Затем может применяться количественный анализ.

2б) Нисходящие методы, исследующие последствия комбинаций неисправностей:

- анализ дерева неисправностей (FTA);
- Марковский анализ;
- анализ сети Петри;
- таблица истинности (анализ функциональной структуры);
- анализ структурной схемы надежности (RBD).

На начальном этапе нисходящего метода определяют одиночное неблагоприятное событие или событие, обеспечивающее функционирование (успех) системы на самом высоком уровне (вершина событий). Затем идентифицируют и анализируют причины этого события на всех уровнях. Нисходящий метод начинают с самого высокого уровня, то есть с анализа надежности в целом си-

стемы или подсистемы и последовательно спускаются на более низкий уровень. Затем анализ проводят на следующем более низком уровне системы, идентифицируют все отказы и соответствующие режимы последствий. Этот процесс продолжают до тех пор, пока не достигнут самого низкого уровня. Нисходящий метод используют для оценки многократных отказов, включая последовательные зависимые отказы, при наличии неисправностей общей причины, а также для сложных систем.

2в) Методы для оценки характеристик основных событий, например,

- прогнозирование интенсивности отказов;
- анализ надежности человеческого фактора (HRA);
- статистические методы надежности;
- программное обеспечение для проектирования надежности (SRE).

Эти методы анализа применимы как для оценки характеристик качества, так и для оценок количественных характеристик при прогнозировании поведения системы в эксплуатации. Достоверность результата зависит от точности и правильности данных об основных событиях.

Однако ни один метод анализа надежности не может быть использован для всестороннего анализа реально существующих систем (аппаратных средств и программного обеспечения, систем со сложной функциональной структурой, систем с различными технологиями ТО и ремонта и т.д.).

Эффективность ремонтируемой системы в большой степени зависит от ремонтпригодности системы, а также от стратегии и методов ТО и ремонта. При необходимости продолжительного функционирования системы эффективным мероприятием по обеспечению работоспособности системы является оценка влияния на надежность системы мероприятий по ее ТО и ремонту. Надежность является эффективным показателем функционирования в тех случаях, когда требуется обеспечение непрерывного функционирования системы.

Ремонт системы в процессе эксплуатации без прерывания ее функционирования обычно возможен только для системы с избыточной структурой. В

этом случае возможность восстановления или замены увеличивает показатели безотказности системы. Обычно для оценки аспектов ТО и ремонта системы проводят специальный анализ.

Для проведения анализа надежности сложных или многофункциональных систем, как правило, необходимо применять несколько дополнительных методов анализа.

На практике использование комбинаций нисходящего и восходящего анализов является весьма эффективным и позволяет обеспечить полноту анализа.

Выбор метода анализа надежности является очень индивидуальным и осуществляется объединенными усилиями экспертов по надежности и эксплуатации системы. Выбор должен быть сделан на ранних этапах разработки ПОН и исследован на применимость.

При выборе конкретного метода или совокупности методов необходимо учитывать следующие особенности:

1) сложность системы. Сложные системы, например, включающие резервирование или другие особенности, обычно требуют более глубокого уровня анализа, чем простые системы;

2) новизна системы. Вновь разрабатываемая система требует более тщательного анализа, чем разработанная ранее;

3) качественный или количественный анализ. Действительно ли количественный анализ необходим?

4) единичные или многократные неисправности. Существенно ли влияние комбинации неисправностей или ими можно пренебречь?

5) поведение системы зависит от времени или последовательности событий. Имеет ли значение для анализа последовательность событий (например, система отказывает только в случае, если событию А предшествует событие В, но не наоборот) или поведение системы зависит от времени (например, ухудшение режимов работы после отказа или выполнения функции)?

6) возможность использования метода для зависимых событий. Зависят ли характеристики отказа или восстановления отдельного элемента системы от состояния системы в целом?

7) восходящий или нисходящий анализ. Обычно применение восходящих методов является более простым. Применение нисходящих методов требует осмысления и творческого подхода и имеет больше возможностей для ошибок;

8) распределение требований надежности. Может ли метод быть приспособлен к количественному распределению требований надежности?

9) квалификация исполнителя. Какой требуется уровень образования или опыта для правильного применения метода;

10) применимость;

11) необходимость инструментальной поддержки. Нуждается ли метод в компьютерной поддержке или он может быть выполнен вручную?

12) проверки правдоподобия. Можно ли проверить правдоподобие результатов вручную? Если нет, являются ли инструментальные средства доступными?

13) работоспособность инструментальных средств. Действительно ли инструментальные средства доступны? Имеют ли эти инструментальные средства общий интерфейс с другими инструментальными средствами анализа, чтобы результаты могли многократно использоваться или передаваться?

14) стандартизация. Существует ли стандарт, устанавливающий требования к представлению его результатов?

Метод структурной схемы надежности применяется в аналитических методах исследования надежности и относится к нисходящему методу анализа (расчета) надежности. Применение данного метода, его пригодность (индивидуальная или в сочетании с другими методами) для оценки надежности (работоспособности) системы и ее составных частей должны исследоваться аналитиком до начала применения метода структурной схемы надежности. Перед применением данного метода необходимо учитывать необходимые для анализа данные, сложность анализа и другие факторы.

Структурная схема надежности является наглядным представлением надежности системы. Она показывает логическую связь элементов системы. Метод структурной схемы надежности предназначен для применения к системам без восстановления и системам, в которых порядок появления отказов не имеет значения. Для систем, порядок отказов в которых должен приниматься во внимание, или систем с восстановлением применяют другие методы моделирования надежности системы, например, Марковский анализ. Предполагается, что в любой момент времени элемент системы может находиться только в одном из двух возможных состояний: работоспособном или неработоспособном.

В символическом представлении не делают различий между открытой и замкнутой схемой или другими моделями отказов, но при определении количественной оценки эти различия необходимо указывать.

– Основой для построения моделей надежности системы является модель, отражающая обеспечение работоспособности системы, а также ее отказ. При этом отказы системы должны быть определены и перечислены. Кроме того, необходимо учитывать:

- функции, выполняемые системой;
- параметры, определяющие надежность системы и допустимые границы изменения этих параметров;
- режимы эксплуатации системы и условия окружающей среды.

Перед построением структурной схемы надежности необходимо дать четкое определение отказа системы, так как работоспособность системы может зависеть от одного или нескольких отказов ее элементов. Для каждого определения отказа системы следующим шагом является деление системы на логические блоки в соответствии с целями анализа надежности. Отдельные логические блоки могут представлять собой подсистемы, каждая из которых, в свою очередь, может быть представлена своей структурной схемой надежности.

Количественный анализ структурной схемы (расчет) надежности проводят различными методами. В зависимости от типа структурной схемы могут

использоваться простые Булевы методы и (или) анализ множества соединений и прерываний. Вычисления проводят на основе данных надежности основных компонент. Необходимо заметить, что структурная схема надежности системы необязательно отражает физические связи ее элементов.

Может оказаться возможным использование системы более чем для одного режима функционирования. Если для каждого режима используются отдельные системы, такие режимы должны обрабатываться независимо от остальных. При этом соответственно должны использоваться самостоятельные модели надежности. Если одна и та же система предназначена для выполнения всех функций, то для каждого типа операций должны использоваться отдельные структурные схемы надежности. Четкие требования надежности, связанные с каждым аспектом функционирования системы, являются необходимой предпосылкой составления структурной схемы надежности.

Необходимо учитывать условия окружающей среды, при которых система будет эксплуатироваться. При этом оценки надежности должны выполняться на основе одной и той же структурной схемы надежности, но с применением интенсивностей отказов, соответствующих конкретным условиям эксплуатации.

Должна быть установлена взаимосвязь между календарным временем работы и циклами процессов включения-выключения системы. Если процессы включения и выключения оборудования не вызывают отказ системы, а интенсивность отказов оборудования при хранении незначительна, то необходимо рассматривать только фактическое время работы элементов системы.

В некоторых случаях процессы включения и выключения являются главной причиной отказов элементов. Кроме того, элементы системы могут иметь более высокую интенсивность отказов при хранении, чем при функционировании (применении по назначению). В сложных случаях, когда включаются и выключаются только части системы, допускаются другие методы (например, Марковский анализ).

При разработке модели надежности системы сначала необходимо дать определение работоспособного состояния системы. Если возможно более одного определения, то для каждого определения необходимо разработать отдельную структурную схему надежности. Затем необходимо разделить систему на блоки так, чтобы определить логику их взаимодействия в системе. При этом каждый блок должен быть статистически независимым и максимально большим. В то же время каждый блок не должен содержать (по возможности) резервирования. Для простоты оценки (расчета) надежности каждый блок должен содержать только такие элементы, которые соответствуют одному и тому же статистическому распределению наработок до отказа.

1.4 Мера неопределенность информации

Мера неопределенности – это количественный показатель, который отражает степень неопределенности или неуверенности в отношении определенной ситуации или решения.

В теории вероятности мера неопределенности может быть измерена с помощью энтропии. Энтропия показывает, насколько случайная или неопределенная случайная величина. Чем выше энтропия, тем больше неопределенность.

В информационной теории мера неопределенности измеряется с помощью количества информации, необходимого для описания или предсказания определенного события или сообщения. Чем больше информация требуется, тем больше неопределенность.

В статистике мера неопределенности может быть измерена с помощью различных показателей, таких как дисперсия или стандартное отклонение. Они показывают, насколько данные разбросаны вокруг среднего значения и, следовательно, насколько неопределены результаты.

В искусственном интеллекте мера неопределенности может быть измерена с помощью понятия неопределенности или неуверенности в принятии решений. Например, в байесовской статистике используется понятие вероятности для оценки неопределенности в отношении определенных параметров или гипотез.

В целом, мера неопределенности является важным инструментом для оценки и учета степени неопределенности в различных областях знаний и помогает принимать более обоснованные и информированные решения.

Мера неопределенности информации в электроэнергетике может быть определена с помощью различных методов и показателей. Некоторые из них включают:

1. Энтропия. Является мерой неопределенности или неорганизованности системы. В электроэнергетике она может быть использована для оценки степени хаоса или неопределенности в распределении энергии или в работе электрических сетей.

2. Информационная энтропия. Это показатель, который измеряет количество информации, содержащейся в системе. В электроэнергетике он может использоваться для определения степени неопределенности или информационной нагрузки, связанной с передачей и распределением электроэнергии.

3. Коэффициент изменения (Rate of Change). Этот показатель измеряет скорость изменения параметров системы электроэнергетики, таких как напряжение, ток или мощность. Более высокий коэффициент изменения указывает на большую неопределенность или нестабильность в системе.

4. Вариация (Variation). Вариация измеряет разброс или различие между значениями параметров системы электроэнергетики. Большая вариация указывает на большую неопределенность или изменчивость в системе.

5. Показатель надежности (Reliability Index). Этот показатель измеряет степень надежности работы системы электроэнергетики. Более низкий показатель надежности указывает на большую неопределенность или риск сбоев в системе [16, 20].

Эти показатели и методы помогают оценить и измерить степень неопределенности информации в электроэнергетике, что может быть полезно для принятия решений и улучшения работы системы.

2 Аналитическая часть

2.1 Показатели надежности сетей и подстанций

В качестве показателей, количественно характеризующих надежность участка сети и ее элементов, рекомендуется использовать:

1. Параметр потока отказов ω (при простейшем параметре потока отказов $\omega = \lambda$), т.е. среднее количество отказов в единицу времени (обычно 1 год), отнесенные к одному элементу, отказ/год. Для линий электропередачи параметр потока отказов может относиться к 1 км линии и измеряется в отказ/(км·год);

2. Среднее время восстановления (аварийного ремонта) T_B , год/отказ;

3. Параметр потока преднамеренных (плановых) отключений ω_P , простой/год;

4. Средняя продолжительность одного преднамеренного отключения T_P , год/простой;

5. Коэффициент готовности (вероятность работоспособного состояния в промежутках между плановыми ремонтами) K_G , о.е;

6. Вероятность вынужденного простоя (вероятность неработоспособного состояния в промежутках между плановыми простоями) K_B , о.е;

7. Вероятность безотказной работы (вероятность того, что в пределах заданного времени или наработки не произойдет отказа) $P(t)$, о.е. Вероятность безотказной работы применяется для невозстанавливаемых систем. Для сетей его рекомендуется использовать до первого отказа, при этом t принимается равным году.

Перечисленные выше показатели надежности являются техническими характеристиками, позволяющими сравнить надежность нескольких альтернатив-

ных вариантов построения сети, а также проверять соответствие уровня надежности рассматриваемого варианта требованиям технического задания на проектирование объекта [10, 12].

Ниже, в таблицах 1-3 приведены усредненные данные по указанным показателям надежности элементов электрической сети (ЛЭП; трансформаторов; выключателей; разъединителей и пр.) [6, 7].

Таблица 1 – Единичные показатели ЛЭП

Тип линии	Номинальное напряжение, кВ	Материал опор	Число цепей		Средняя частота устойчивых отключений, 1/100 км/год	Среднее время восстановления, час	Средняя частота плановых простоев, 1/год	Среднее время планового простоя, час	
1	2	3	4		5	6	7	8	
воздушные	до 1				25,0	2,0	0,17	5,0	
	6-10				7,6	5,0	0,17	6,0	
	35	сталь	одноцепные		0,9	9,0	2,1	16,0	
			двух-цепные	откл. 1 цепь	1,1	6,0	1,0	13,0	
				откл. 2 цепи	0,5	8,0	0,3	9,0	
		железобетон	одноцепные		0,7	10,0	1,2	15,0	
			двух-цепные	откл. 1 цепь	0,8	10,0	1,3	14,0	
				откл. 2 цепи	0,1	12,0	0,2	13,0	
		дерево	одноцепные		1,5	13,0	2,5	16,0	
		110	сталь	одноцепные		1,3	9,0	2,1	15,0
				двух-цепные	откл. 1 цепь	1,7	7,0	3,8	15,0
	откл. 2 цепи				0,2	10,0	0,4	19,0	
	железобетон		одноцепные		0,7	11,0	1,6	16,0	
			двух-цепные	откл. 1 цепь	1,0	9,0	2,4	12,0	
				откл. 2 цепи	0,2	15,0	0,4	13,0	
	дерево		одноцепные		1,5	10,0	3,6	14,0	
	220		сталь	одноцепные		0,5	11,0	2,8	17,0
				двух-цепные	откл. 1 цепь	0,6	11,0	3,3	14,0
		откл. 2 цепи			0,1	15,0	0,5	24,0	
		железобетон	одноцепные		0,4	9,0	1,8	24,0	
			двух-цепные	откл. 1 цепь	0,5	9,0	1,1	17,0	
				откл. 2 цепи	0,1	8,0	0,3	10,0	
		дерево	одноцепные		0,6	11,0	5,4	18,0	

Окончание Таблицы 1

1	2	3	4	5	6	7	8	
	330	сталь	одноцепные	0,6	11,0	3,0	21,0	
			двух- цепные	откл. 1 цепь	0,9	10,0	7,3	15,0
				откл. 2 цепи	0,1	2,0	0,3	11,0
	железо- бетон	одноцепные	0,3	15,0	2,9	20,0		
	550	сталь	одноцепные	0,2	14,0	3,1	18,0	
		железо- бетон	одноцепные	0,2	13,0	3,5	23,0	
	750	сталь	одноцепные	0,2	20,0	0,17	25,0	
кабельные	до 1			10	2,0	1,0	2,0	
	6-10			7,5	16,0	1,0	2,0	
	20-35			3,2	16,0	1,0	2,0	

Таблица 2 – Единичные показатели надежности трансформаторов

Номинальная мощность, МВА	Номинальное напряжение, кВ	Средняя частота отказов, 1/год	Среднее время восстановления, ч	Средняя частота текущих ремонтов, 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч	Средняя частота капитальных ремонтов, 1/год	Средняя продолжительность кап. ремонта, ч
до 2,5	6-20	0,016	50	0,25	6	0,166	150
	35	0,010	40	0,25	6	0,166	200
2,5-7,5	6-20	0,008	120	0,25	8	0,166	150
	35	0,007	65	0,25	26	0,166	200
	110	0,018	40	0,25	28	0,166	250
10-80	35 и ниже	0,012	70	0,75	26	0,166	200
	110	0,014	70	0,75	28	0,166	280
	220	0,035	60	0,75	28	0,166	300
более 80	110	0,075	95	1,0	30	0,166	300
	220	0,025	60	1,0	30	0,166	330
	330	0,053	45	1,0	30	0,166	380
	500-750	0,024	220	1,0	50	0,166	400

Таблица 3 – Единичные показатели надежности выключателей

Вид выключателей	Номинальное напряжение, кВ	Средняя частота отказов, КЗ/обрыв цепи	Среднее время восстановления, ч	Вероятность отказа за на коммутационную операцию	Вероятность отказа при отключении КЗ	Средняя частота капитальных ремонтов, 1/год	Средняя продолжительность кап. ремонта, ч	Средняя частота текущих ремонтов, 1/год	Средняя продолжительность текущего ремонта, ч
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
автоматические	до 1	0,02/0,03	4			0,33	10	0,67	8
электромагнитные	6-10	0,01/0,01	11	0,002	0,027	0,2	24	0,8	16
	10	0,003/0,007	20	0,003	0,005	0,14	8	0,86	8
маломасляные	20	0,002/0,008	26	0,003	0,005	0,14	10	0,86	8

Окончание Таблицы 3

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
маломасляные	35	0,014/0,016	25	0,005	0,005	0,14	9	0,86	8
	110-150	0,02/0,04	20	0,006	0,013	0,14	30	0,86	8
масляные баковые	35	0,002/0,007	30	0,006	0,006	0,14	12	0,86	8
	110	0,005/0,011	40	0,004	0,006	0,14	23	0,86	8
	220	0,015/0,040	50	0,011	0,009	0,14	43	0,86	8
воздушные	35	0,004/0,016	40	0,013	0,012	0,2	29	0,8	8
	110	0,003/0,017	20	0,004	0,004	0,2	45	0,8	12
	220	0,004/0,016	55	0,004	0,006	0,2	122	0,8	15
	330	0,005/0,026	48	0,002	0,006	0,2	160	0,8	16
	500	0,025/0,125	60	0,007	0,003	0,2	130	0,8	20
	750	0,050/0,200	75	0,009	0,003	0,2	270	0,8	30
	1150	0,060/0,240	90	0,010	0,004	0,2	350	0,8	40

Состояние элементов характеризуется рядом показателей надежности, то есть на их основе можно судить о том, насколько сеть адаптирована к внешним условиям и внутреннему управлению. С точки зрения управления процессами в сетях оценка надежности относится к задаче кибернетики. С другой стороны, вопросы состояния энергосистемы связаны с синергетикой. Связь этих научных направлений достигается за счет применения теории информации, в которой значимое место имеет неопределенность информации. Измерение неопределенности через ее меру позволяет оценить изменяющееся состояние электроэнергетической системы под воздействием нежелательных факторов вероятностной природы.

При оценке надежности, приходится иметь дело со множеством факторов случайной природы, поэтому речь далее пойдет о неопределённости информации. Параметром её оценки в организационно-экономической системе является энтропия, рассматриваемая как мера неопределённости. С её помощью можно измерить состояние системы, сопоставив его с некоторыми «идеальными условиями», когда знание о ситуации полностью детерминировано [1,2].

2.2 Анализ исходных данных

Рассматривая показатели распределения электроэнергии по временным интервалам, определяются вероятности отказов оборудования $q_i(\lambda)$, не исключая

соблюдения условия: $\sum q_i(\lambda) = 1$. Данные значения вероятностей предварительно вычислены на обработки эксплуатационных данных, что означает наличие возможностей в применении меры вероятности. Еще одной из мер можно выделить меру неопределенности информации, получившей название – информационная энтропия. Её величина вычисляется по формуле Шеннона [9]:

$$H = -\sum_{i=1}^n q_i \log_2 q_i, \text{ бит, при условии } \sum_{i=1}^n q_i = 1, \quad (2.1)$$

где n – количество оборудования, участвующего в анализе.

Энтропия Шеннона наделена свойствами:

1) Энтропия максимальна при равенстве между собой вероятностей отказов. Это значение будет свидетельствовать о хаотическом поведении (отказ или работа) оборудования сетей и подстанций.

2) Энтропия равна нулю тогда, когда только одно из всех возможных значений $q_i=1$, тогда как остальные равны нулю. В данном случае можно сказать, что только одна единица оборудования из множества имеющихся в сети в течение всего срока эксплуатации находилась в нерабочем состоянии [3].

Далее, на конкретном примере предложим к рассмотрению расчет общего количества отключений одноименного оборудования λ и продолжительности внезапных отключений T_B потребителей за год. Анализу подлежали 8 трансформаторных подстанций районных электрических сетей Республики Хакасия. Результаты расчетов представлены в таблицах 4-11.

Таблица 4 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 1

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее T_B , час	Среднее λ , %	Среднее T_B , %
1	2	3	4	5	6
Разъединитель 35 кВ	4	0,015	Резерв	0,39%	
Линейный разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	0,39%	
Выключатель 35 кВ	2	0,014	Резерв	0,36%	
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	2	0,009	Резерв	0,23%	

Окончание Таблицы 4

1	2	3	4	5	6
Линейный разъединитель 10 кВ	16	0,012	4	0,31%	4,80%
Разъединитель 10 кВ	14	0,02	6,62	0,52%	7,95%
Линейный выключатель 10 кВ	8	0,018	17,5	0,47%	21,01%
Разъединителей ввода 10 кВ	4	0,02	Резерв	0,52%	
Выключатель ввода 10 кВ	2	0,02	Резерв	0,52%	
ВЛ 10 кВ	8	3,684	5,93	95,79%	7,12%
ТП 10/0,4 кВ	8	0,019	49,25	0,49%	59,12%
Среднее значение		0,350	16,660		
Всего		3,846	83,3		

Анализ данных, представленных в таблице 4, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.2.1) повреждения на ВЛ 10 кВ составляют 95,79% всех внезапных отключений элементов СЭС.

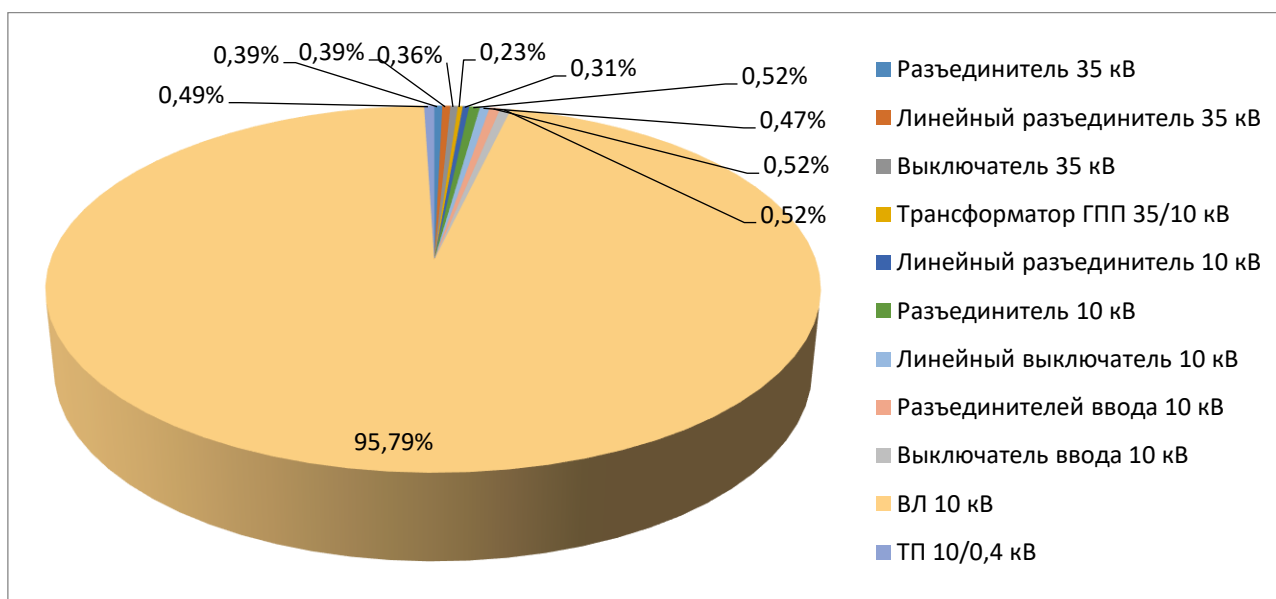


Рисунок 2.1 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.2.2) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ и составляют 59,12%.

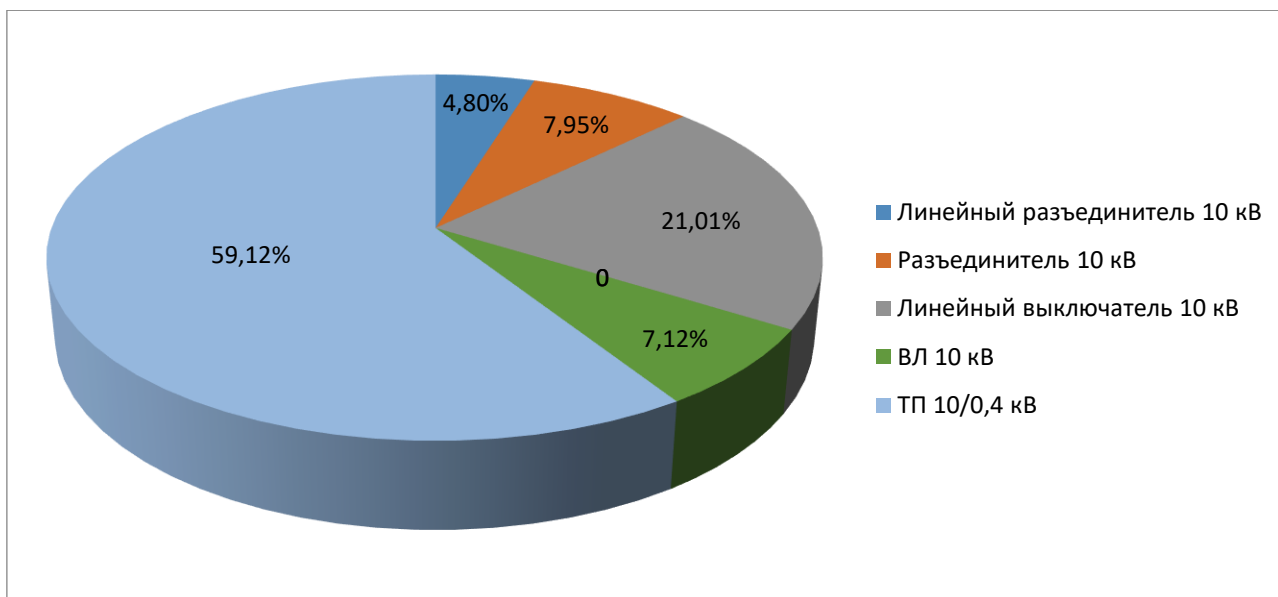


Рисунок 2.2 – Распределение среднего $T_{в}$ по элементам сети

Таблица 5 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 2

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее $T_{в}$, час	Среднее λ , %	Среднее $T_{в}$, %
Разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	2,30%	
Линейный разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	2,30%	
Выключатель 35 кВ	2	0,014	Резерв	2,15%	
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	2	0,009	Резерв	1,38%	
Линейный разъединитель 10 кВ	26	0,012	2,5	1,84%	3,32%
Разъединитель 10 кВ	14	0,02	3	3,07%	3,98%
Линейный выключатель 10 кВ	13	0,0153	21	2,35%	27,89%
Разъединитель ввода 10 кВ	4	0,02	Резерв	3,07%	
Выключатель ввода 10 кВ	2	0,02	Резерв	3,07%	
КЛ 10 кВ	8	0,005	2,8	0,77%	3,72%
ВЛ 10 кВ	13	0,487	6	74,77%	7,97%
ТП 10/0,4 кВ	13	0,019	40	2,92%	53,12%
Среднее значение		0,054	12,550		
Всего		0,6513	75,3		

Анализ данных, представленных в таблице 5, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.2.3) повреждения на ВЛ 10 кВ составляют 74,77% всех внезапных отключений элементов СЭС.

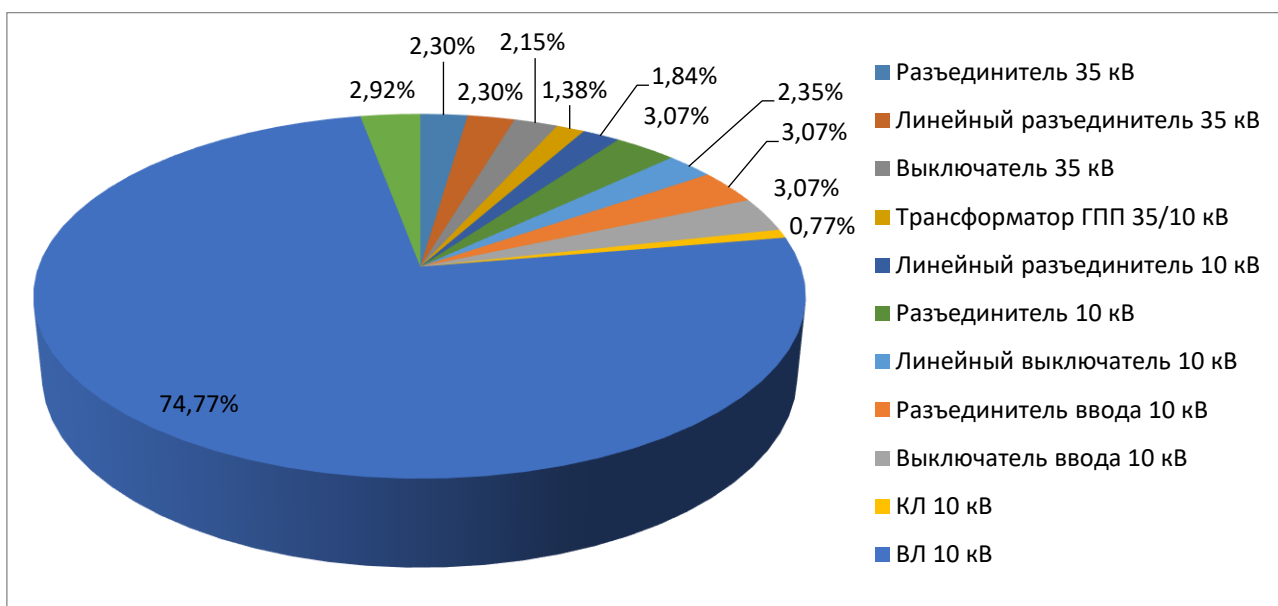


Рисунок 2.3 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.2.4) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ и составляют 53,12%.

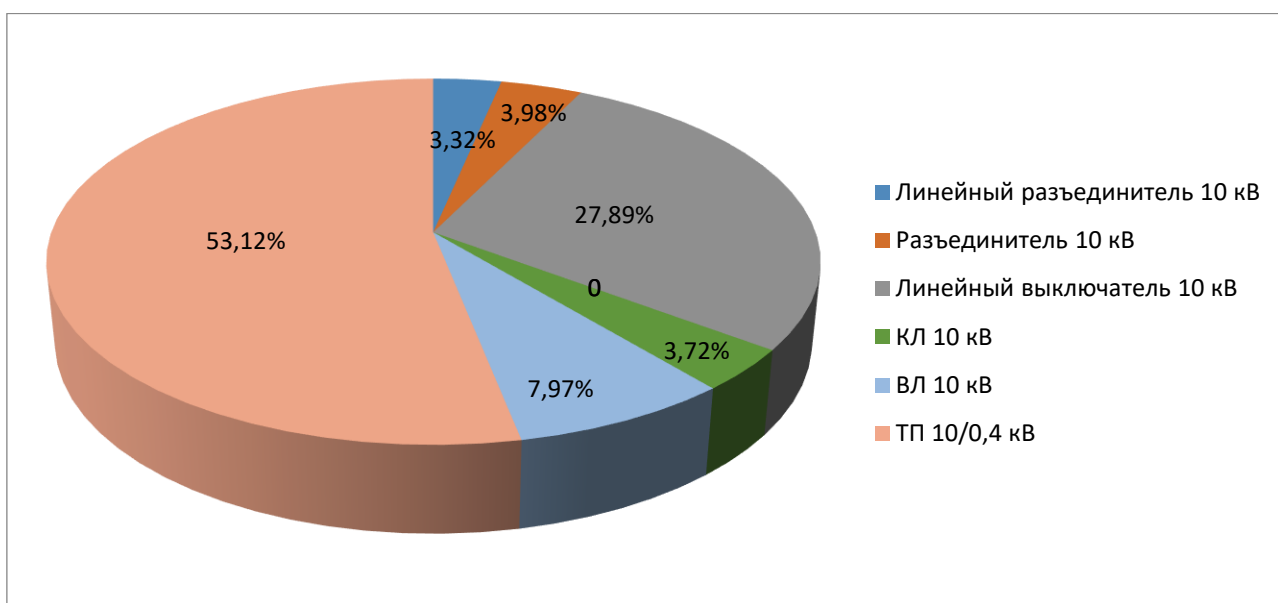


Рисунок 2.4 – Распределение среднего $T_{в}$ по элементам сети

Таблица 6 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 3

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее Тв, час	Среднее λ , %	Среднее Тв, %
Линейный разъединитель 35 кВ	4	0,015	Резерв	0,38%	
Отделитель 35 кВ	2	0,018	Резерв	0,45%	
Короткозамыкатель 35 кВ	2	0,017	Резерв	0,43%	
Линейный выключатель 35 кВ	1	0,014	Резерв	0,35%	
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	2	0,014	Резерв	0,35%	
Линейный разъединитель 10 кВ	12	0,012	3,66	0,30%	4,38%
Линейный выключатель 10 кВ	6	0,018	16,33	0,45%	19,54%
Разъединитель ввода 10 кВ	4	0,02	Резерв	0,50%	
Выключатель ввода 10 кВ	2	0,02	Резерв	0,50%	
ВЛ 10 кВ	6	3,81	6	95,32%	7,18%
Разъединитель 10 кВ	6	0,02	5,41	0,50%	6,47%
ТП 10/0,4 кВ	6	0,019	52,16	0,48%	62,42%
Среднее значение		0,333	16,712		
Всего		3,997	83,56		

Анализ данных, представленных в таблице 6, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.2.5) повреждения на ВЛ 10 кВ составляют 95,32% всех внезапных отключений элементов СЭС.

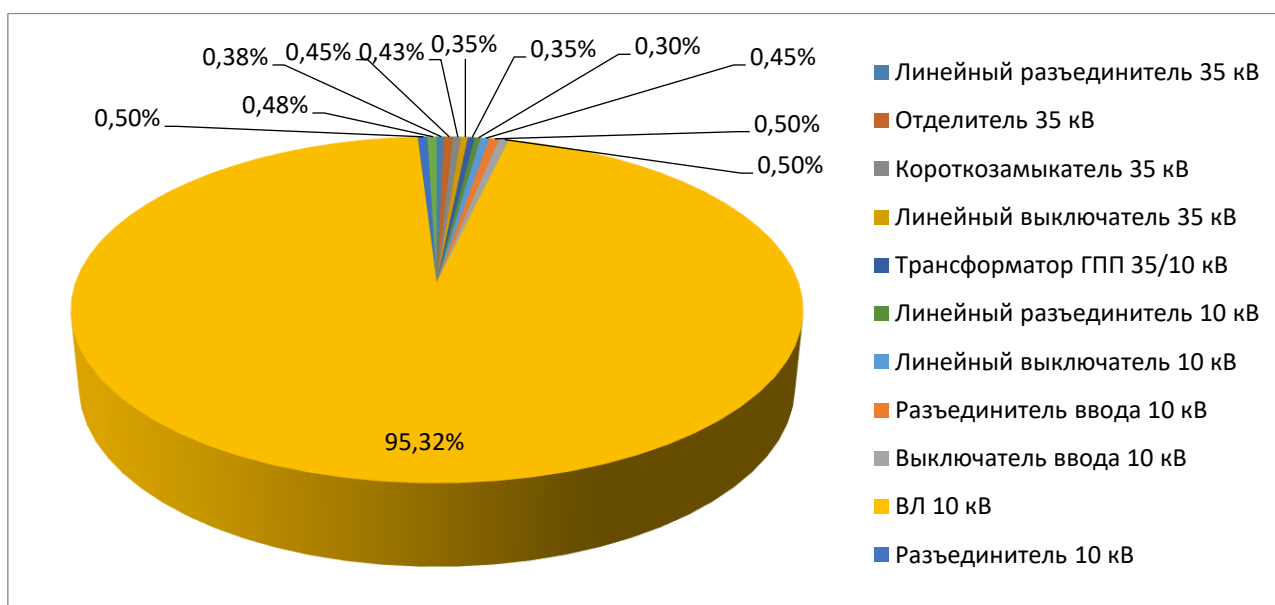


Рисунок 3.1 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.3.2) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ и составляют 62,42%.

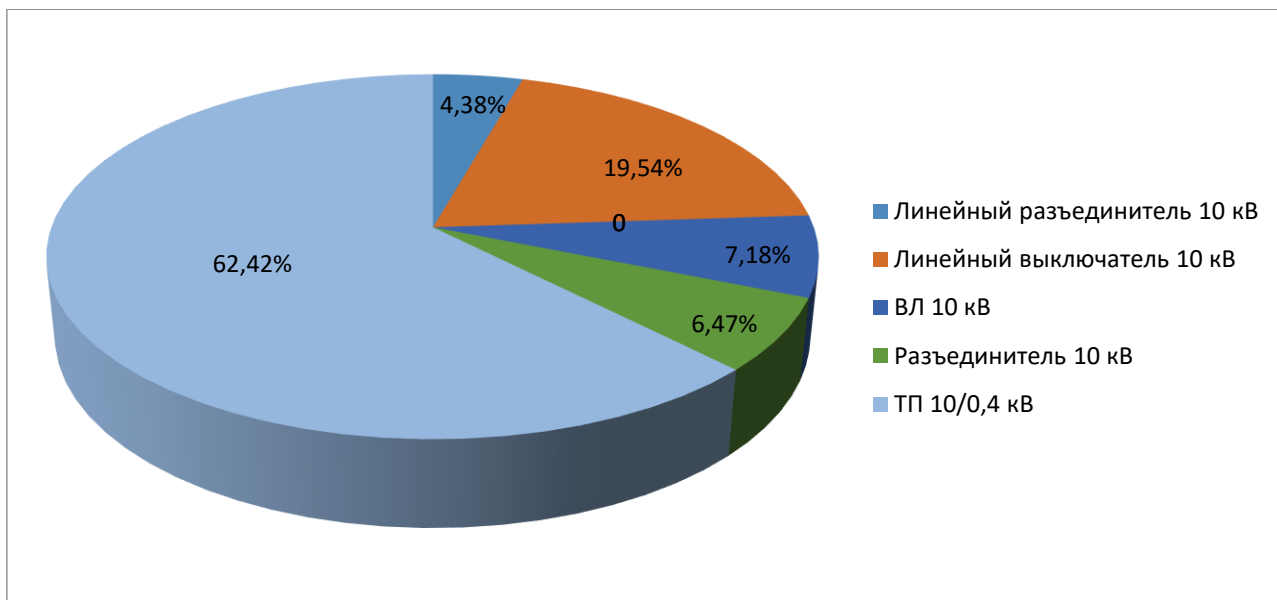


Рисунок 3.2 – Распределение среднего $T_{в}$ по элементам сети

Таблица 7 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 4

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее $T_{в}$, час	Среднее λ , %	Среднее $T_{в}$, %
Линейный разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	0,33%	
Разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	0,33%	
Выключатель 35 кВ	2	0,014	Резерв	0,31%	
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	2	0,014	Резерв	0,31%	
Линейный разъединитель 10 кВ	12	0,012	3,83	0,26%	4,93%
Линейный выключатель 10 кВ	6	0,018	18,8	0,40%	24,20%
Разъединитель ввода 10 кВ	4	0,02	Резерв	0,44%	
Выключатель ввода 10 кВ	2	0,02	Резерв	0,44%	
ВЛ 10 кВ	6	4,372	5,25	96,32%	6,76%
Разъединитель 10 кВ	6	0,02	5,66	0,44%	7,28%
ТП 10/0,4 кВ	6	0,019	44,16	0,42%	56,83%
Среднее значение		0,413	15,54		
Всего		4,539	77,7		

Анализ данных, представленных в таблице 7, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.4.1) повреждения на ВЛ 10 кВ составляют 96,32% всех внезапных отключений элементов СЭС.

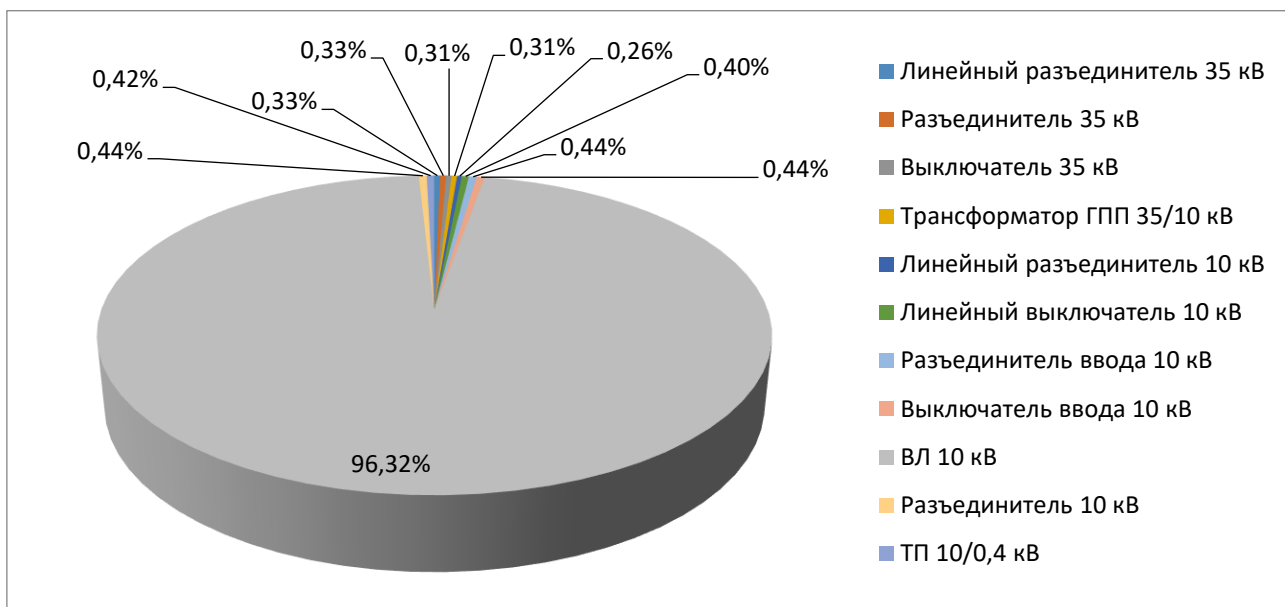


Рисунок 2.5 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.2.6) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ и составляют 56,83%.

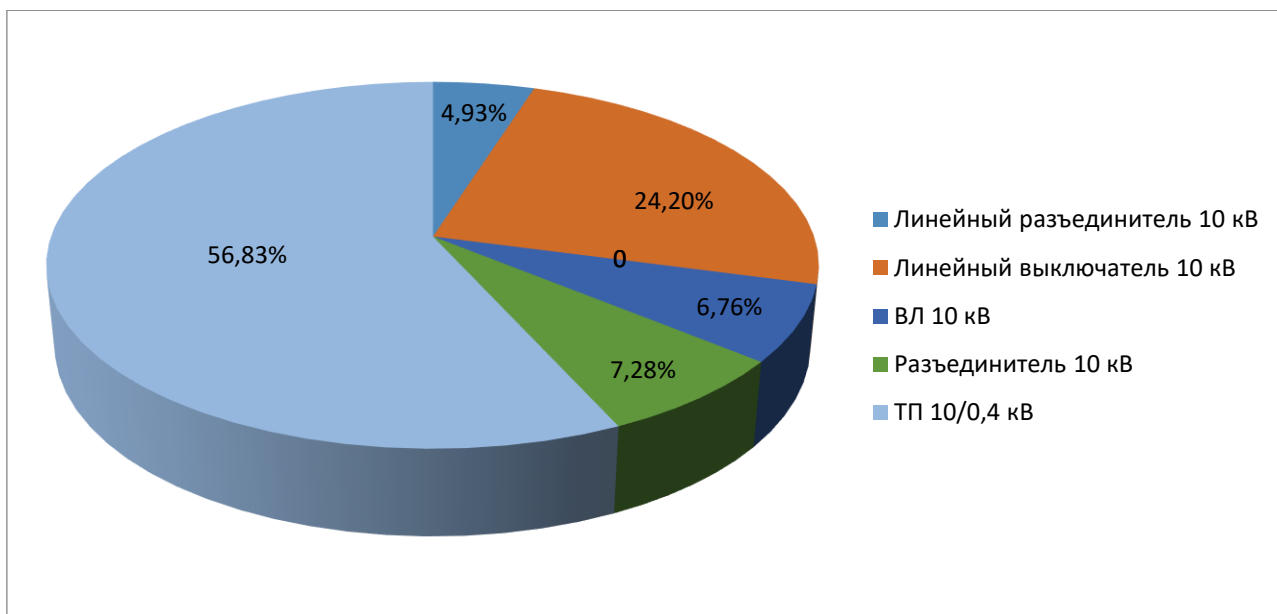


Рисунок 2.6 – Распределение среднего $T_{в}$ по элементам сети

Таблица 8 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 5

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее $T_{в}$, час	Среднее λ , %	Среднее $T_{в}$, %
Линейный разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	0,43%	
Разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	0,43%	
Выключатель 35 кВ	2	0,014	Резерв	0,40%	
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	2	0,014	Резерв	0,40%	
Линейный разъединитель 10 кВ	10	0,012	3,7	0,35%	5,03%
Линейный выключатель 10 кВ	5	0,018	11	0,52%	14,97%
Разъединитель ввода 10 кВ	4	0,02	Резерв	0,58%	
Выключатель ввода 10 кВ	2	0,02	Резерв	0,58%	
ВЛ 10 кВ	5	3,3	5,8	95,18%	7,89%
Разъединитель 10 кВ	5	0,02	6	0,58%	8,16%
ТП 10/0,4 кВ	5	0,019	47	0,55%	63,95%
Среднее значение		0,315	14,7		
Всего		3,467	73,5		

Анализ данных, представленных в таблице 8, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.2.7) повреждения на ВЛ 10 кВ составляют 95,18% всех внезапных отключений элементов СЭС.

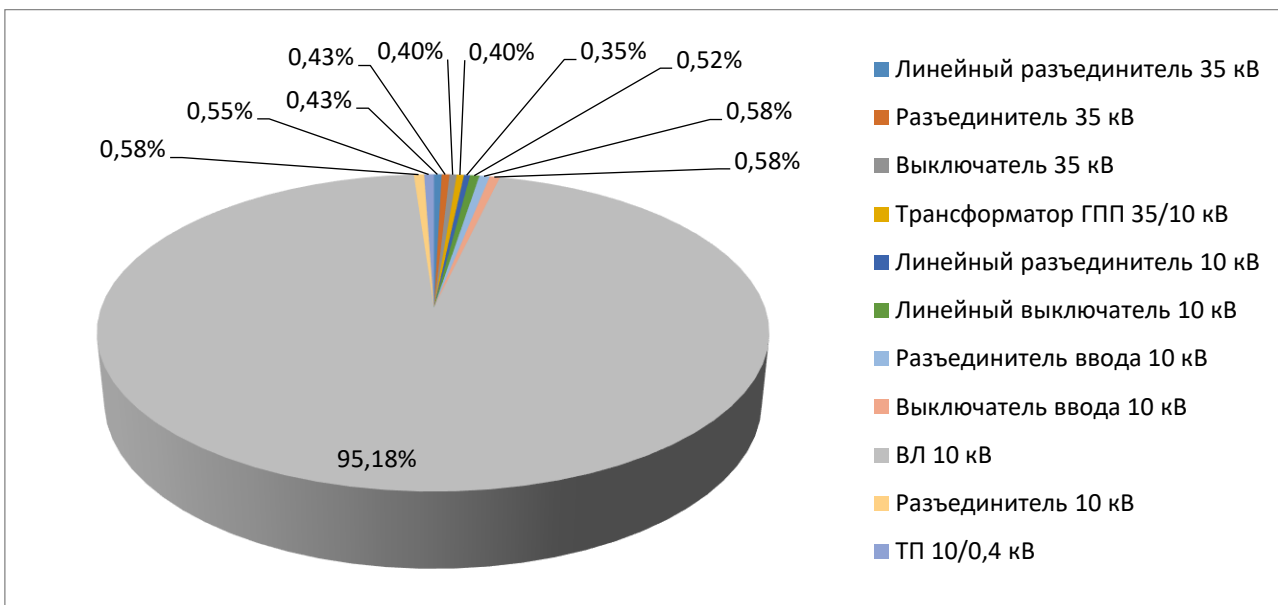


Рисунок 2.7 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.2.8) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ и составляют 63,95%.

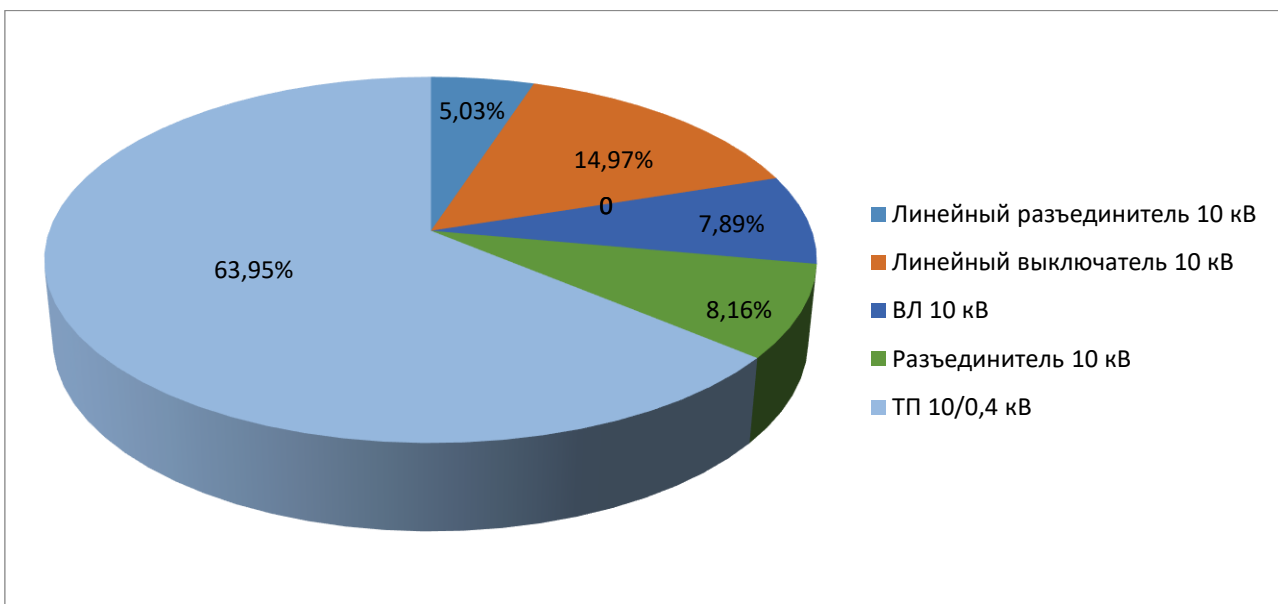


Рисунок 2.8 – Распределение среднего $T_{в}$ по элементам сети

Таблица 9 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 6

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее Тв, час	Среднее λ , %	Среднее Тв, %
Линейный разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	0,54%	
Разъединитель 35 кВ	2	0,015	Резерв	0,54%	
Трансформатор ГПП 35/10 кВ	2	0,014	Резерв	0,50%	
Линейный разъединитель 10 кВ	8	0,012	6	0,43%	6,33%
Линейный выключатель 10 кВ	4	0,018	23,5	0,65%	24,80%
Разъединитель ввода 10 кВ	4	0,02	Резерв	0,72%	
Выключатель ввода 10 кВ	2	0,02	Резерв	0,72%	
ВЛ 10 кВ	4	2,62	8,5	94,48%	8,97%
Разъединитель 10 кВ	4	0,02	8	0,72%	8,44%
ТП 10/0,4 кВ	4	0,019	48,75	0,69%	51,45%
Среднее значение		0,2773	18,95		
Всего		2,773	94,75		

Анализ данных, представленных в таблице 9, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.2.9) повреждения на ВЛ 10 кВ составляют 94,48% всех внезапных отключений элементов СЭС.

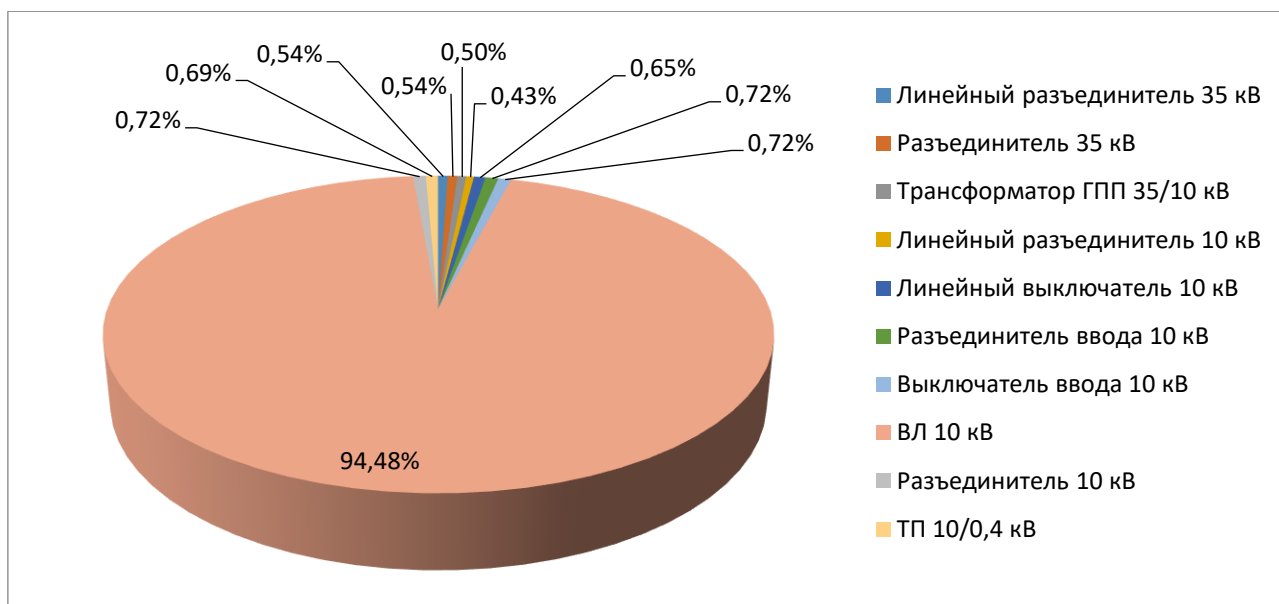


Рисунок 2.9 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.2.10) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ и составляют 51,45%.

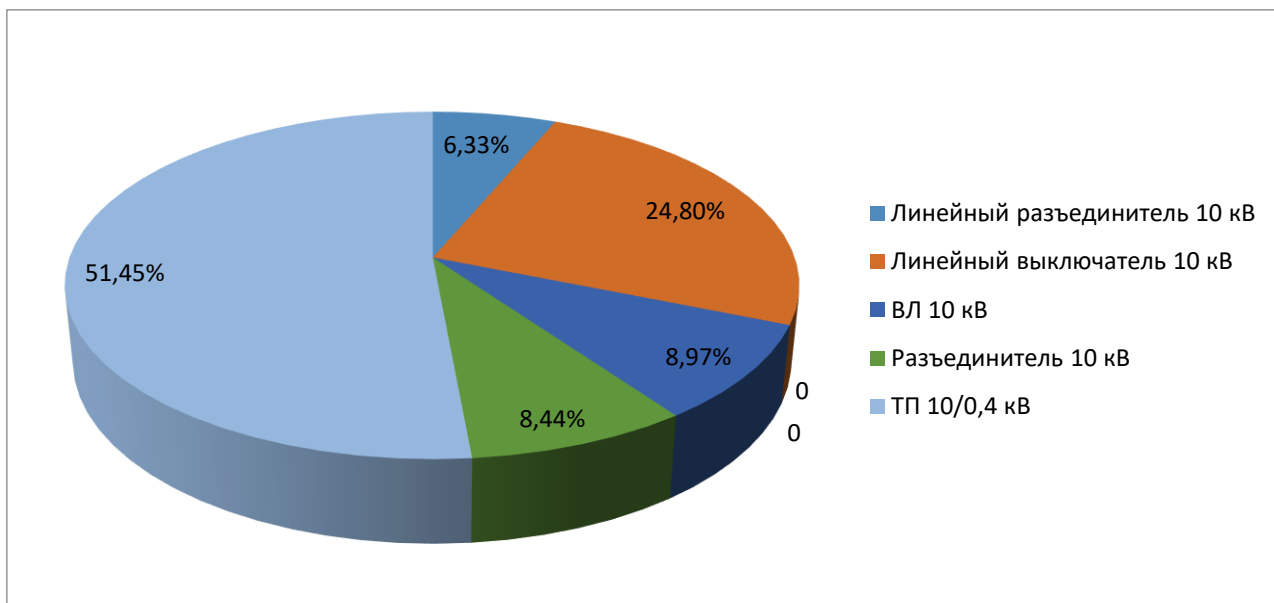


Рисунок 2.10 – Распределение среднего $T_{в}$ по элементам сети

Таблица 10 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 7

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее $T_{в}$, час	Среднее λ , %	Среднее $T_{в}$, %
Линейный разъединитель 110 кВ	3	0,013	Резерв	0,29%	
Разъединитель 110 кВ	2	0,013	Резерв	0,29%	
Выключатель 110 кВ	2	0,06	Резерв	1,33%	
Трансформатор ГПП 110/35/10 кВ	2	0,016	Резерв	0,35%	
Линейный выключатель 10 кВ	12	0,018	8,41	0,40%	13,09%
Выключатель ввода 10 кВ	2	0,02	Резерв	0,44%	
КЛ 10 кВ	12	0,0123	5,33	0,27%	8,30%
ВЛ 10 кВ	12	4,33	5,5	95,77%	8,56%
Разъединитель 10 кВ	33	0,02	3,75	0,44%	5,84%
ТП 10/0,4 кВ	12	0,019	41,25	0,42%	64,21%
Среднее значение		0,452	12,848		
Всего		4,521	64,240		

Анализ данных, представленных в таблице 10, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.2.11) повреждения на ВЛ 10 кВ составляют 95,77% всех внезапных отключений элементов СЭС.

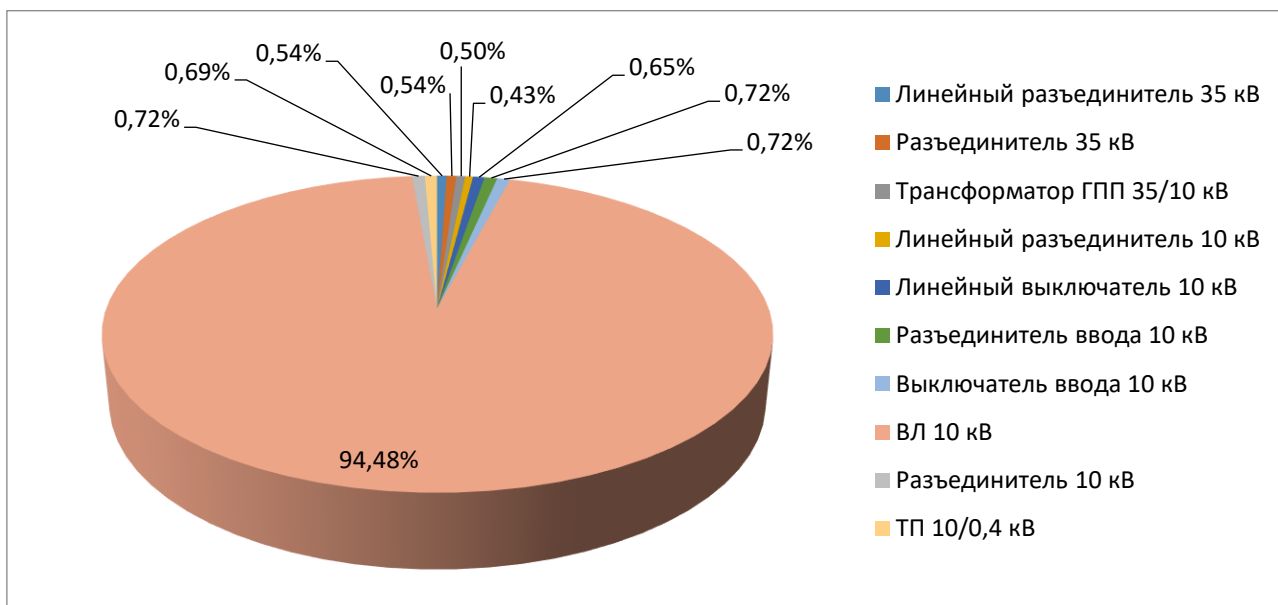


Рисунок 2.11 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.2.12) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформаторной подстанции ТП 10/0,4 кВ и составляют 64,21%.

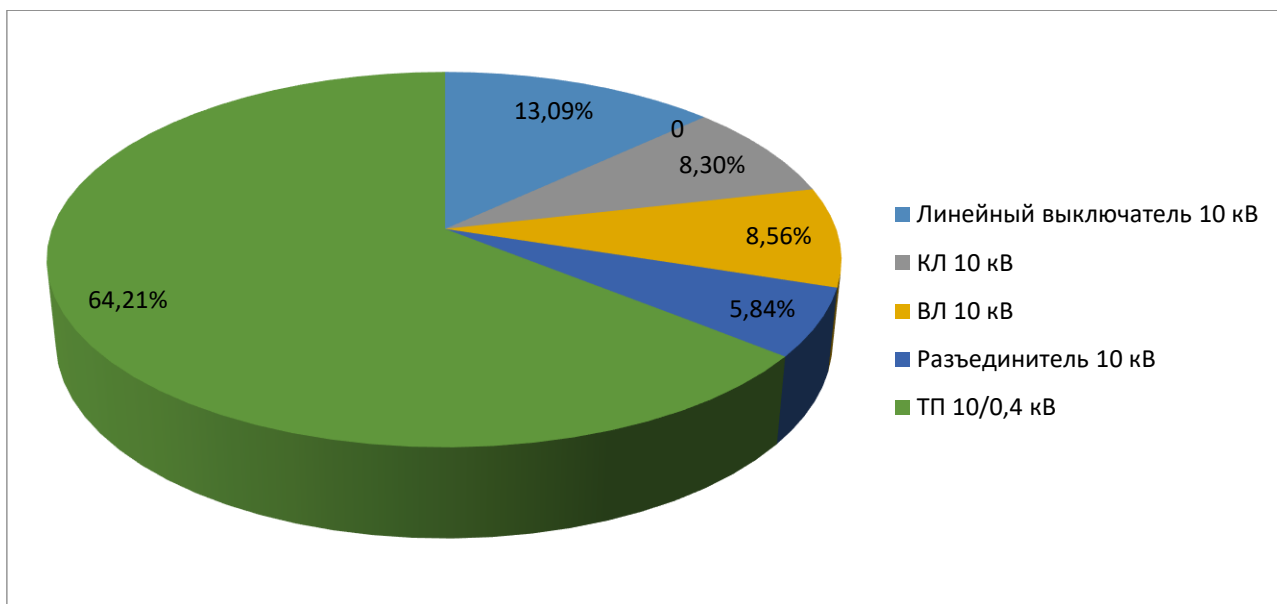


Рисунок 2.12 – Распределение среднего $T_{в}$ по элементам сети

Таблица 11 – Усредненные значения параметров надежности оборудования Подстанции 8

Элемент сети	Количество	Среднее λ , отказ/год	Среднее $T_{в}$, час	Среднее λ , %	Среднее $T_{в}$, %
Линейный разъединитель 110 кВ	1	0,013	14	0,97%	4,65%
Выключатель 110 кВ	1	0,06	26	4,46%	8,63%
Трансформатор ГПП 110/35/6 кВ	2	0,017	78	1,26%	25,90%
Линейный выключатель 6-10 кВ	3	0,016	25	1,19%	8,30%
Выключатель ввода 6-10 кВ	1	0,02	26	1,49%	8,63%
Трансформатор "Согласующий" Т 6/10 кВ	1	0,019	58	1,41%	19,26%
ВЛ 6-10 кВ	3	1,16	8	86,31%	2,66%
Разъединитель 6-10 кВ	5	0,02	9,8	1,49%	3,25%
ТП 6/0,4 кВ, ТП 10/0,4 кВ	3	0,019	56,33	1,41%	18,71%
Среднее значение		0,149	33,459		
Всего		1,344	301,13		

Анализ данных, представленных в таблице 11, показал, что самым ненадежным элементом системы электроснабжения (СЭС) является воздушная линия ВЛ 6-10 кВ. Как следует из анализа и видно на диаграмме (рис.2.13) повреждения на ВЛ 6-10 кВ составляют 86,31% всех внезапных отключений элементов СЭС.

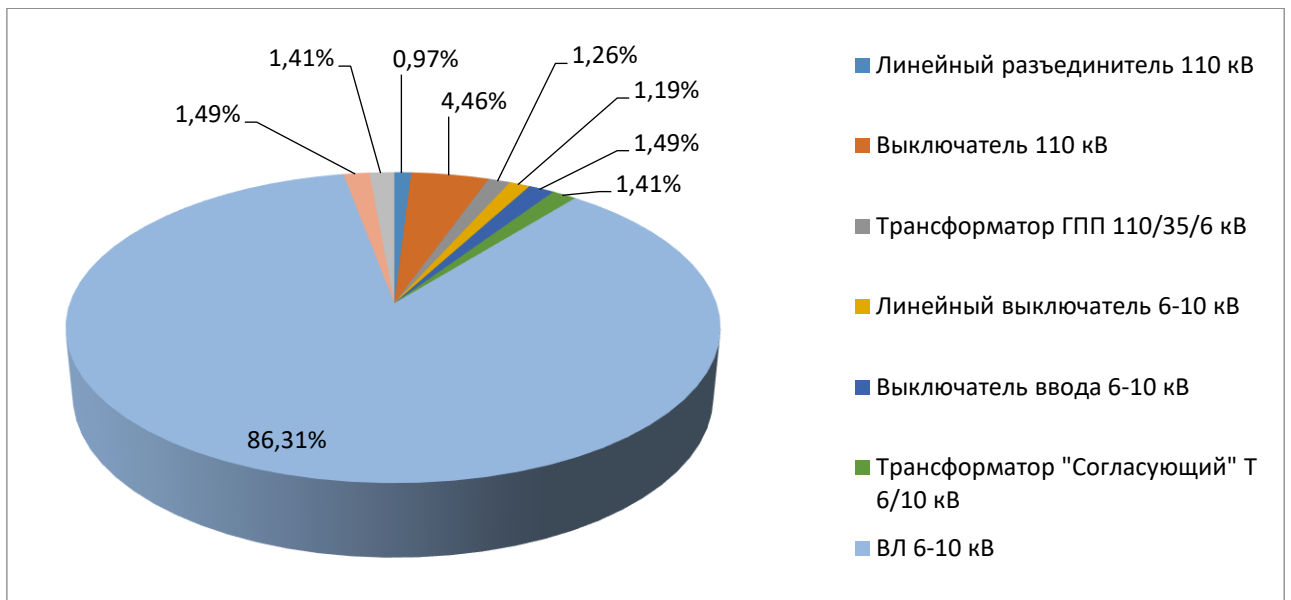


Рисунок 2.13 – Распределение среднего λ по элементам сети

Анализ показателей продолжительности внезапных отключений, как видно на диаграмме (рис.2.14) показал, что наибольшее время восстановления относится к трансформатору ГПП 110/35/6 кВ и составляют 25,9%.

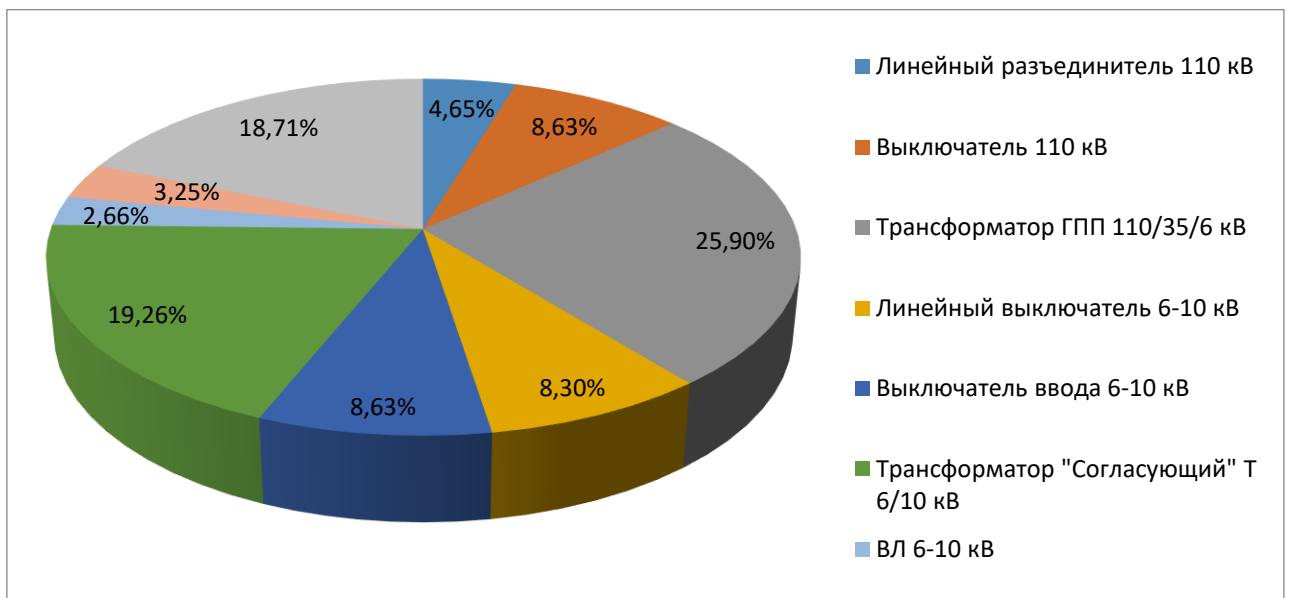


Рисунок 2.14 – Распределение среднего T_B по элементам сети

Данные, представленные в табл.4-11 позволяют вычислить через значение λ величину вероятности отказов q_i и энтропию H_i по формуле (2.1).

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=1}^8 \lambda_i = 25,139;$$

$$q_1 = \frac{\lambda_1}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{3,846}{25,139} = 0,153;$$

$$H_1 = -q_1 \cdot \log_2 q_1 = -0,153 \cdot \log_2 0,153 = 0,414;$$

$$q_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{0,651}{25,139} = 0,026;$$

$$H_2 = -q_2 \cdot \log_2 q_2 = -0,026 \cdot \log_2 0,026 = 0,137;$$

$$q_3 = \frac{\lambda_3}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{3,997}{25,139} = 0,159;$$

$$H_3 = -q_3 \cdot \log_2 q_3 = -0,159 \cdot \log_2 0,159 = 0,422;$$

$$q_4 = \frac{\lambda_4}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{4,539}{25,139} = 0,18;$$

$$H_4 = -q_4 \cdot \log_2 q_4 = -0,18 \cdot \log_2 0,18 = 0,445;$$

$$q_5 = \frac{\lambda_5}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{3,467}{25,139} = 0,138;$$

$$H_5 = -q_5 \cdot \log_2 q_5 = -0,138 \cdot \log_2 0,138 = 0,394;$$

$$q_6 = \frac{\lambda_6}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{2,773}{25,139} = 0,11;$$

$$H_6 = -q_6 \cdot \log_2 q_6 = -0,11 \cdot \log_2 0,11 = 0,35;$$

$$q_7 = \frac{\lambda_7}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{4,521}{25,139} = 0,18;$$

$$H_7 = -q_7 \cdot \log_2 q_7 = -0,18 \cdot \log_2 0,18 = 0,445;$$

$$q_8 = \frac{\lambda_8}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{1,344}{25,139} = 0,054;$$

$$H_8 = -q_8 \cdot \log_2 q_8 = -0,054 \cdot \log_2 0,054 = 0,227.$$

Вычислив для всех 8 подстанций данные показатели, представим их расчеты в таблице 12.

Таблица 12 – Сводная таблица расчета вероятности отказа и энтропии

№ подстанции	1	2	3	4	5	6	7	8
q_i	0,153	0,026	0,159	0,18	0,138	0,11	0,18	0,054
H_i	0,414	0,137	0,422	0,445	0,394	0,35	0,445	0,227

Таким образом, оценка структурной надежности рассматриваемых сетей и подстанций до 110кВ показала значимость применения меры вероятности и меры информации. Измеряя на каждом интервале времени состояние оборудования, можно отслеживать уровень надежности в процессе эволюции сетей и подстанций.

3 Аналитическая часть

3.1 Анализ выполненных расчетов

Для анализа полученных данных в качестве инструмента была выбрана программная платформа SPSSStatistics. Это обусловлено рядом ключевых преимуществ:

1. Мощные статистические инструменты: SPSS Statistics предоставляет широкий спектр статистических инструментов для анализа данных, включая дескриптивную статистику, тесты гипотез, регрессионный анализ, факторный анализ, анализ дисперсии и многие другие.

2. Удобный пользовательский интерфейс: Программа имеет интуитивно понятный пользовательский интерфейс, что делает работу с данными и проведение анализа более удобным для пользователей всех уровней.

3. Визуализация данных: SPSS Statistics предлагает широкие возможности визуализации данных, включая графики, диаграммы, ящики с усами и другие инструменты для наглядного представления результатов анализа.

4. Возможности работы с большими объемами данных: Программа позволяет работать с большими объемами данных и проводить сложные анализы без необходимости использования дополнительных инструментов.

5. Поддержка различных форматов данных: SPSS Statistics поддерживает различные форматы данных, что позволяет импортировать данные из различных источников и использовать их для анализа.

6. Расширенные возможности: Программа также предлагает расширенные возможности, такие как создание пользовательских скриптов, автоматизация процессов анализа и интеграция с другими статистическими и аналитическими инструментами.

В целом, SPSS Statistics является мощным и удобным инструментом для проведения статистического анализа данных, что делает его популярным среди исследователей, ученых, студентов и профессионалов в различных областях.

Рассмотрим суммарные показатели отказов по категориям: воздушные линии, кабельные линии, оборудование 110кВ, оборудование 35кВ, оборудование 10кВ, трансформаторы. Мы можем провести корреляционный анализ в среде SPSSStatistic, который позволяет проследить четкую зависимость (значимую корреляцию на уровне 0,01) между отказами оборудования 110, 35 и 10кВ.

Коэффициент корреляции – это статистическая мера, которая оценивает степень взаимосвязи между двумя переменными. Он измеряет силу и направление линейной связи [5, 24].

Коэффициент корреляции принимает значение от -1 до 1. Величина коэффициента по модулю показывает степень зависимости:

0 – связь отсутствует;

0,01-0,3 – слабая связь;

0,31-0,7 – умеренная связь;

0,71-0,99 – сильная связь;

1 – полная линейная корреляция.

		Корреляции					
		ВЛ	КЛ	кв110	кв35	кв10	тп
ВЛ	Корреляция Пирсона	1	,095	-,041	,140	,161	-,325
	Знач. (односторонняя)		,411	,462	,371	,351	,216
	N	8	8	8	8	8	8
КЛ	Корреляция Пирсона	,095	1	,619	-,521	-,549	-,115
	Знач. (односторонняя)	,411		,051	,093	,079	,393
	N	8	8	8	8	8	8
кв110	Корреляция Пирсона	-,041	,619	1	-,960**	-,990**	,677*
	Знач. (односторонняя)	,462	,051		,000	,000	,033
	N	8	8	8	8	8	8
кв35	Корреляция Пирсона	,140	-,521	-,960**	1	,959**	-,724*
	Знач. (односторонняя)	,371	,093	,000		,000	,021
	N	8	8	8	8	8	8
кв10	Корреляция Пирсона	,161	-,549	-,990**	,959**	1	-,749*
	Знач. (односторонняя)	,351	,079	,000	,000		,016
	N	8	8	8	8	8	8
тп	Корреляция Пирсона	-,325	-,115	,677*	-,724*	-,749*	1
	Знач. (односторонняя)	,216	,393	,033	,021	,016	
	N	8	8	8	8	8	8

** . Корреляция значима на уровне 0,01 (односторонняя).
* . Корреляция значима на уровне 0,05 (односторонняя).

Рисунок 9 – Корреляционный анализ отказов оборудования Подстанций 1-8

Корреляционный анализ показал, что стабильно высокий показатель отказов ВЛ 10кВ не зависит от отказов других структурных составляющих подстанций. Таким образом, мы можем рассматривать данный показатель отдельно.

Для анализа используем данные о количестве внезапных отключений с 2018 по 2022 годы следующего оборудования:

- ВЛ–110 кВ; ВЛ–35 кВ; ВЛ(ВЛИ) –10 кВ; КЛ–10 кВ;
- силовые трансформаторы 110/35/10 кВ; 35/10 кВ;
- трансформаторы собственных нужд 10/0,4 кВ;

- ТП 10/0,4 кВ; ТП 6/0,4 кВ;
- разъединители 110 кВ; 35 кВ; 10 кВ;
- отделители 35 кВ;
- выключатели 110 кВ; 35 кВ; 10 кВ.

Используемые данные взяты из оперативного журнала и журнала учета аварийных отключений. Далее рассмотрим расчет общего количества отключений λ за 5 лет по каждому году в отдельности. Анализу подлежало одноименное оборудование РЭС, результаты представлены в таблице 13.

Таблица 13 – Общее количество отключений одноименного оборудования

Элемент сети	2018 год	2019 год	2020 год	2021 год	2022 год
ВЛ 110кВ	10	14	17	16	15
ВЛ 35кВ	10	4	8	10	6
ВЛ 10кВ	50	71	40	85	78
Трансформаторы 110/35/10кВ	5	2	2	7	1
ТСН 10кВ	0	0	0	0	0
ТП 10/0,4кВ	5	11	22	35	37
Выключатель 110/35/10кВ	0	0	0	0	1
Разъединитель 110/35кВ	0	0	0	0	0
Разъединитель 10кВ	1	2	0	1	0

Данные, представленные в таблице 13 позволяют вычислить через значение λ величину вероятности отказов q_i и энтропию H_i по формуле (1).

$$\lambda_{\Sigma} = \sum_{i=2018}^{2022} \lambda_i = 324;$$

$$q_{2018} = \frac{\lambda_{2018}}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{50}{324} = 0,154;$$

$$H_{2018} = -q_{2018} \cdot \log_2 q_{2018} = -0,154 \cdot \log_2 0,154 = 0,416;$$

$$q_{2019} = \frac{\lambda_{2019}}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{71}{324} = 0,219;$$

$$H_{2019} = -q_{2019} \cdot \log_2 q_{2019} = -0,219 \cdot \log_2 0,219 = 0,48;$$

$$q_{2020} = \frac{\lambda_{2020}}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{40}{324} = 0,124;$$

$$H_{2020} = -q_{2020} \cdot \log_2 q_{2020} = -0,124 \cdot \log_2 0,124 = 0,373;$$

$$q_{2021} = \frac{\lambda_{2021}}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{85}{324} = 0,262;$$

$$H_{2021} = -q_{2021} \cdot \log_2 q_{2021} = -0,262 \cdot \log_2 0,262 = 0,506;$$

$$q_{2022} = \frac{\lambda_{2022}}{\lambda_{\Sigma}} = \frac{78}{324} = 0,241;$$

$$H_{2022} = -q_{2022} \cdot \log_2 q_{2022} = -0,241 \cdot \log_2 0,241 = 0,495;$$

Вычислив для каждого из 5 лет данные показатели, представим их расчеты в таблице 14.

Таблица 14 – Сводная таблица расчета вероятности отказа и энтропии для ВЛ 10кВ

Год	2018	2019	2020	2021	2022
q_i	0,154	0,219	0,124	0,262	0,241
H_i	0,416	0,48	0,373	0,506	0,495

Имея статистические данные вероятностей отказа и энтропии за прошедшие периоды мы можем спрогнозировать поведение системы в будущем.

Необходимость прогнозирования отказов оборудования в энергетических системах обусловлена тем, что это позволяет предотвратить потенциальные простои, сбои и аварии, обеспечивая более надежную и безопасную работу системы, поскольку энергетические системы должны быть готовы к различным изменениям в спросе, а также к возможным отказам оборудования и другим факторам, которые могут повлиять на стабильность и надежность поставок электроэнергии.

Используя программную платформу SPSSStatistics мы можем выбрать наиболее подходящую модель прогнозирования.

			Тип модели
ИД модели	VAR00001	Модель_1	Хольт

Рисунок 3.1 – Описание модели прогнозирования

В данном случае мы используем модель Хольта – эта модель подходит для рядов, в которых имеется линейный тренд и отсутствует сезонность. Ее параметры предназначены для независимого сглаживания уровня и тренда. Модель экспоненциального сглаживания Хольта является более общей, чем модель Брауна, но ее подгонка может занять больше времени для длинных рядов. Модель экспоненциального сглаживания Хольта в наибольшей степени напоминает модель АРПСС с нулевым порядком авторегрессии и двумя порядками дифференцирования и скользящего среднего [4].

Анализ статистик модели позволяем сделать вывод о возможности прогнозирования по данным временного ряда.

Модель	Число предикторов	Статистики подгонки модели	Q-статистика Льюнга-Бокса (18)			Число выбросов
		Стационарный R-квадрат	Статистика	DF	Значимость	
VAR00001-Модель_1	0	,933	.	0	.	0

Рисунок 3.2 – Статистики модели Хольта

Значение Стационарный R-квадрат дает оценку доли общей вариации в ряду, которая объясняется данной моделью. Чем выше это значение (максимум 1,0), тем лучше согласие модели. В данном случае значение $>0,9$, что говорит о приемлемости модели Хольта для прогнозирования.

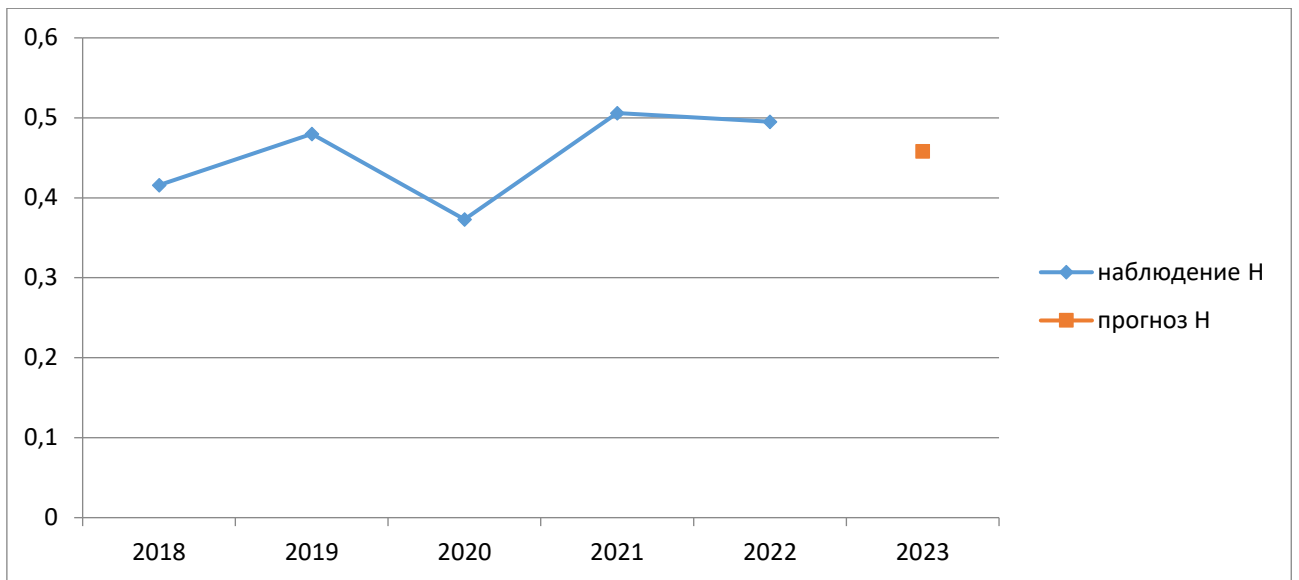


Рисунок 3.3 – Прогноз значения H на будущий период

Пользуясь данными оперативного журнала и журнала учета аварийных отключений можем определить основные причины отказа оборудования:

- воздействие ветровых нагрузок – 48%;
- повреждение провода, обрыв – 16%;
- неустановленные причины случаи, когда отключение сопровождалось успешным АПВ, а осмотр не выявил видимых повреждений) – 16%;
- повреждение старение) изоляции – 9%;
- воздействие атмосферных перенапряжений (гроза) – 8%;
- воздействие птиц и животных – 3%.

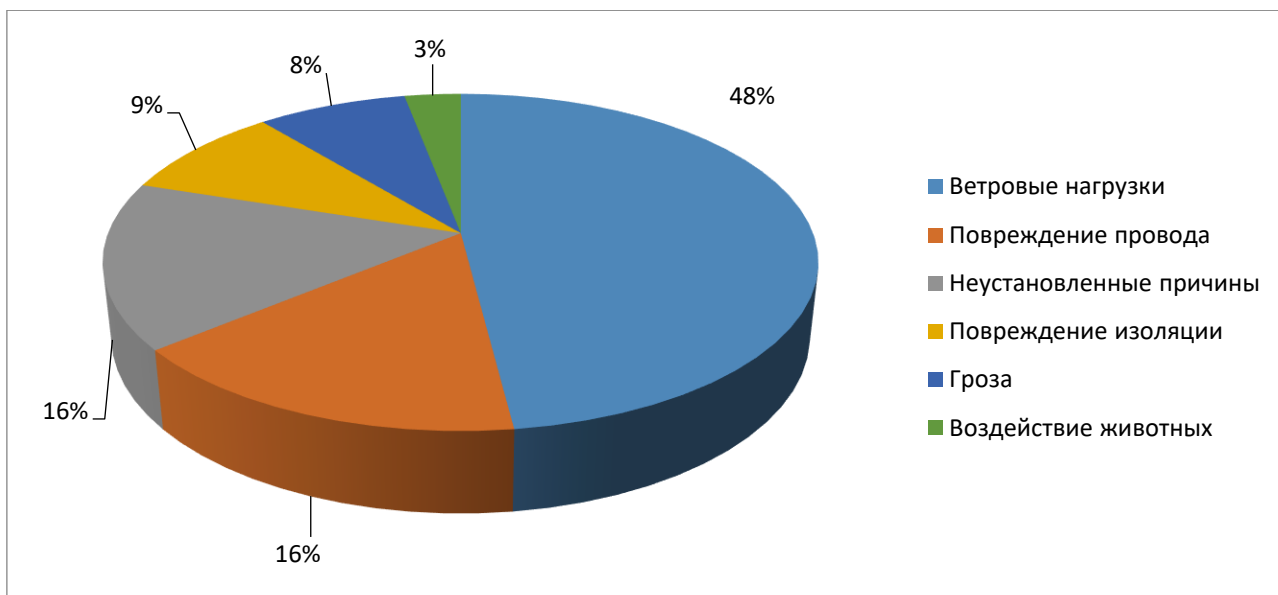


Рисунок 3.4 – Основные причины отключений

3.2 Выводы по работе

По результатам анализа мы видим, что за рассматриваемый период отсутствуют повреждения, обусловленные человеческим фактором.

Обеспечение надежности сетей и подстанций в энергетических системах требует комплексного подхода и ряда мероприятий. Некоторые из них включают:

1. Регулярное техническое обслуживание: Проведение регулярных инспекций, технического обслуживания и проверок оборудования для выявления и устранения потенциальных проблем.

2. Разработка и исполнение планов аварийной готовности: Создание и регулярное обновление планов действий в случае аварийных ситуаций, включая эвакуацию персонала, борьбу с пожарами, эвакуацию и др.

3. Реактивная и проактивная замена оборудования: Проведение замены устаревшего или подверженного отказам оборудования, как по мере необходимости, так и в рамках плановой профилактики.

4. Использование современных технологий мониторинга: Установка систем мониторинга, контроля и диагностики для раннего обнаружения потенциальных проблем, и отказов.

5. Разработка и обучение персонала: Проведение обучения и тренировок для персонала по вопросам безопасности, технического обслуживания и реагирования на аварийные ситуации.

6. Анализ и управление рисками: Проведение анализа рисков и разработка стратегий управления рисками, включая оценку вероятности отказов и разработку мер по их смягчению.

Эти и другие мероприятия помогают обеспечить высокий уровень надежности сетей и подстанций в энергетических системах, уменьшая вероятность отказов и минимизируя негативные последствия возможных аварий.

Согласно Концепции обеспечения надежности в электроэнергетике, разработанной под эгидой Минэнерго РФ, одним из ключевых направлений является разработка системы прогнозирования надежности.

Сравнение усредненных показателей надежности (табл. 1-3) и результатов, полученные в ходе выполнения работы, позволяют сделать вывод о том, что усредненные показатели не актуальны и требуют пересмотра с учетом географических, климатических, демографических, экономических и прочих характеристик.

Применение меры неопределенности информации позволяет гибко реагировать на изменения и адаптировать планы к новым обстоятельствам, чтобы повысить надежность сетей и подстанций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения работы по теме «Применение меры неопределенности информации в оценке структурной надежности сетей и подстанций» были изучены методы и методики определения показателей структурной надежности. Особое внимание было отведено обработке статистической информации с помощью методов компьютерного моделирования, математической статистики и информационных технологий с визуализацией. В работе были определены основные критерии оценки структурной надежности. Было определено, что для принятия решений и улучшения работы системы целесообразно использовать метод Шеннона, помогающий оценить и измерить степень неопределенности информации в электроэнергетике.

В результате выполнения работы были обработаны статистические данные, зафиксированные с помощью программно-технического комплекса КИСУ ТРО на базе SAPERP, в котором фиксируются все внезапные (аварийные) отключения, а также данные из оперативного журнала и журнала учета аварийных отключений. Обработка данных осуществлялась с помощью IBM SPSS Statistics – аналитического программного обеспечения, позволяющего производить продвинутый статистический анализ данных, охватывая решение всех задач от планирования и сбора данных до непосредственного анализа.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

ГОСТ – государственный стандарт.

ТО – техническое обслуживание.

СЭС – система электроснабжения.

ВЛ – воздушная линия.

КЛ – кабельная линия.

ТП – трансформаторная подстанция.

ГПП – главная понизительная подстанция.

РЭС – районные электрические сети.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Васильев А.П. Средства обеспечения надежности электроснабжения потребителей / А.П. Васильев, А.Г. Турлов // Проблемы энергетики. 2006. – № 3–4. – С. 19–35.
2. Воротницкий В.Э. Норматив потерь электроэнергии в электрических сетях. Как его определить и выполнить? // Новости электротехники, 2003–№6(24). [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2003/24/11.php>.
3. Воротницкий, В. Э. Мероприятия по снижению потерь электроэнергии в электрических сетях энергоснабжающих организаций / В. Э. Воротницкий, М. А. Калинкина, В. Н. Апрыткин // Энергосбережение, 2009. – № 3. – С. 53-56.
4. Герасимова, О.О. Методы анализа надежности и риска [Текст] : учебное пособие / О.О. Герасимова, С.А. Карауш. – Томск : Изд-воТом.гос.архит.-строит. ун-та, 2017. – 64с. :ISBN 978-5-93057-782-2
5. Гмурман, В.Е. Теория вероятностей и математическая статистика [Текст]: учеб. пособие / В.Е. Гмурман. – М.: Высш. школа, 2001. – 479 с.
6. ГОСТ 20911-89 Техническая диагностика. Термины и определения. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200009481>
7. ГОСТ 27.002-2015 Надежность в технике (ССНТ). Термины и определения. – Введ. 01.03.2017. – Москва : Стандартинформ, 2016. – 23 с.
8. Гук, Ю.Б. Теория надежности в электроэнергетике [Текст]: учеб.пособие / Ю.Б. Гук. – Л.: Энергия, 1990. –204 с.
9. Железко, Ю. С. Расчет технологических потерь электроэнергии в электрических сетях / Ю. С. Железко, А. В. Артемьев, О. В. Савченко // Энергетик, 2007. – № 2. – С. 29–30.
10. Китушин, В.Г. Надежность энергетических систем. Часть 1. Теоретические основы [Текст]: учеб. пособие / В.Г. Китушин. –Новосибирск: изд-во НГТУ, 2003. – 256 с.

11. Коммерческие потери электроэнергии и их снижение. Автор Мохов С.Л. [Электронный ресурс] URL: <http://energoser18.ru/energoberezhnie/propaganda/publikaczii/kommercheskie-poteri-elektroenergii-i-ix-snizhenie.html> (дата обращения 18.10.2019).
12. МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ. Единая система конструкторской документации. ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ДОКУМЕНТЫ. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200106869>
13. Могиленко А. Снижение потерь электроэнергии. Подход к планированию и оценке мероприятий // Новости электротехники, №4(40), 2006г. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2006/40/12.php>.
14. Общие положения. Для исследования надежности оборудования и технологических схем, для разработки мероприятий по обеспечению и оптимизации их надежности. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://studopedia.ru/15_160130_obshchie-polozheniya.html
15. Острейковский, В.А. Теория надежности [Текст]: учеб. рек. УМО/ В.А. Острейковский. -2-е изд., испр. - М.: Высш. шк., 2008. – 464 с.
16. Отказ // Википедия. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Отказ>
17. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей // Консультант плюс – надежная правовая система. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_40861/
18. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) // Консультант плюс – надежная правовая система. [Электронный ресурс] – Режим доступа: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_98464/
19. Савина, Н. В. Системный анализ потерь электроэнергии в электрических распределительных сетях[Текст]: учебное пособие / Н. В. Савина, Н. И. Воропай. – Новосибирск: Наука, 2008. – 228 с.
20. Теория надежности // Википедия. [Электронный ресурс] – Режим доступа: https://ru.wikipedia.org/wiki/Теория_надёжности


21. Теория надежности в энергетике: учеб.-метод. Пособие [Электронный ресурс] / А.В. Бобров, В.А. Тремясов. – Электрон.дан. – Красноярск: Сиб. Федер. ун-т, 2013.
22. Шеметов, А.Н. Надежность электроснабжения [Текст]: учеб. Пособие для студентов специальности 140211 «Электроснабжение» / А.Н. Шеметов. – Магнитогорск: изд-во ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», 2006. – 141 с.
23. Электротехнический интернет – портал. [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://www.elec.ru/articles/rlkv-s/>
24. Электротехнический справочник в 4 т. Т.2. М.: Изд-во МЭИ, 2003. 518 с.
25. Энергосбережение, коммерческие потери электроэнергии и их снижение [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://www.energosber18.ru>

Министерство науки и высшего образования РФ
Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт
институт

Электроэнергетики
кафедра

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой

 В.И. Пантелеев
инициалы, фамилия
«19» 12 2023г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Применение меры неопределенности информации в оценке структурной
надежности сетей и подстанций





наименование темы

13.04.02 – «Электроэнергетика и электротехника»

код и наименование направления

13.04.02.09 «Автоматизация энергетических систем»

код и наименование магистерской программы

Руководитель	 19.12.23 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.э.н. должность, ученая степень	<u>Н. В. Дулесова</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 19.12.2023 подпись, дата		<u>И. В. Комиссарова</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 19.12.2023 подпись, дата	Замдиректора по научной работе ИТИ ХГУ им. Н. Ф. Катанова, канд. техн. наук должность, ученая степень	<u>Д.Ю.Карандеев</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 19.12.23 подпись, дата	доц. каф ЭМиАТ, к.т.н. должность, ученая степень	<u>А. В. Коловский</u> инициалы, фамилия

Красноярск 2023