

На правах рукописи



Горшунов Андрей Андреевич

**ИССЛЕДОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ И ТЕХНИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ
СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ МОНОПОТРЕБИТЕЛЕЙ НА
ОСНОВЕ РИСК-ОРИЕНТИРОВАННОГО ПОДХОДА**

Специальность 2.4.3 -Электроэнергетика

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет».

Научный руководитель: **Секретарев Юрий Анатольевич**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Назарычев Александр Николаевич,**
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский горный университет Императрицы Екатерины II», кафедра электроэнергетики и электромеханики, профессор кафедры;

Пантелеев Василий Иванович,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Сибирский федеральный университет», кафедра электроэнергетики, профессор кафедры.

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет», г. Томск.

Защита состоится «12» ноября 2026 г. в 10:00 часов на заседании диссертационного совета 24.2.347.05 при Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630073, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, I корпус, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета и на сайте организации www.nstu.ru.

Автореферат разослан « ____ » сентября 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
канд. тех. наук, доцент



Анатолий Анатольевич Осинцев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Оценка надежности систем электроснабжения (СЭС) является одной из ключевых задач в электроэнергетике. Методы расчета надежности электрических сетей и СЭС разработаны достаточно давно и основаны на использовании статистических данных об отказах элементов системы. На основе показателей надежности элементов могут быть получены оценки схемной надежности, характеризующиеся вероятностью безотказной работы СЭС.

В практике управления надежностью СЭС применяются различные способы оценки допустимого уровня надежности. Один из них основан на нормировании показателей надежности, когда требуемые значения надежности задаются нормативными документами или принимаются на основе опыта эксплуатации. Другой способ связан с оценкой последствий отказов, выраженных в виде экономического ущерба, возникающего вследствие нарушений электроснабжения потребителей. Данный способ представляет особый интерес, поскольку позволяет учитывать не только вероятность возникновения отказов, но и тяжесть их последствий.

Однако практическое применение методов оценки ущерба от нарушений электроснабжения часто связано со значительными трудностями. На многих промышленных предприятиях технологические процессы имеют сложную структуру и включают большое количество взаимосвязанных производственных операций. В таких условиях оценка экономических последствий недоотпуска электрической энергии становится затруднительной, поскольку один и тот же объем недоотпущенной электроэнергии может приводить к различным производственным потерям в зависимости от особенностей технологического процесса.

В этом отношении особый интерес представляют потребители электрической энергии, для которых основная часть потребляемой электроэнергии используется в рамках одного основного технологического процесса. Для таких объектов нарушение электроснабжения приводит к сокращению производства однородной продукции, связанной с функционированием одного технологического процесса. К числу подобных объектов относятся, например, системы добычи нефти и газа, дата-центры (*data center*), где результатом производственной деятельности является получение однотипного продукта. В этом случае отказ элементов СЭС непосредственно вызывает остановку технологического оборудования и приводит к уменьшению объема добычи. Данное обстоятельство позволяет установить зависимость между работоспособностью СЭС и объемом выпуска однородной продукции, что существенно упрощает оценку экономических последствий от нарушения электроснабжения.

В дальнейшем под системой электроснабжения монопотребителя будем понимать электроснабжение месторождения, основные элементы которого (кусты) производят одинаковую продукцию (в данном случае, нефть) в рамках единого технологического процесса.

При рассмотрении нескольких СЭС с монопотребителем возникает возможность применения риск-ориентированного подхода (РОП), основанного на совместном учете вероятности отказов элементов системы и тяжести их последствий. Необходимость использования данного подхода во многом обусловлена современными экономическими условиями эксплуатации промышленных предприятий, характеризующимися ограниченностью финансовых и эксплуатационных ресурсов, выделяемых на техническое обслуживание и ремонт (ТОиР) электрооборудования. При этом важным фактором является учет текущего технического состояния электрооборудования, поскольку показатели надежности элементов системы могут существенно изменяться в процессе эксплуатации. Совместный учет схемной надежности СЭС и текущего технического состояния ее элементов позволяет получать более реалистичные оценки вероятности отказов и связанных с ними рисков.

Таким образом, разработка математических моделей риск-ориентированного управления надежностью в СЭС монопотребителей является актуальной задачей.

Степень разработанности темы исследования. Проблемам обеспечения надежности электроэнергетических систем (ЭЭС) и СЭС промышленных предприятий посвящено значительное количество научных исследований. Основы теории надежности ЭЭС были сформированы в работах отечественных и зарубежных ученых, в которых разработаны методы оценки показателей надежности элементов и схем электроснабжения, а также методы анализа отказов и их последствий.

Значительный вклад в развитие методов анализа надежности электроэнергетических систем внесли такие исследователи, как А.В. Андрюшин, Ю.Б. Гук, В.Г. Китушин, В.М. Левин, Б.В. Лукутин, М.Ш. Мисриханов, А.Н. Назарычев, И.В. Наумов, В.А. Непомнящий, Н.Л. Новиков, В.П. Обоскалов, В.И. Пантелеев, Б.В. Папков, М.Н. Розанов, Ю.Н. Руденко, Ю.А. Секретарев, В.А. Тремясов, И.А. Ушаков, Ю.А. Фокин, Ю.Я. Чукреева, В.И. Эдельман и другие. Развитие данного направления также представлено в работах зарубежных исследователей R. Billinton, R. Allan, C. Singh, J. Mitra, L. Bertling Tjernberg, и др.

Также большой вклад в развитие методов анализа риска и принятия решений в сложных технических системах внесли отечественные ученые В.А. Абчук, Н.И. Воропай, И.А. Рябинин, В.Н. Рябченко, Л.А. Кочергин и многие другие. Данной теме посвящены работы зарубежных авторов J. von Neumann, L. Savage, H. Raiffa и др.

Несмотря на значительное количество исследований в области надежности ЭЭС, вопросы оценки надежности и одновременного учета технического состояния СЭС потребителей в рамках риск-ориентированного подхода остаются недостаточно разработанными.

Таким образом, использование современных методов математического моделирования и возможностей вычислительной техники позволяет разрабатывать модели поддержки принятия решений, основанные на оценке

рисков отказов электротехнического оборудования и учитывающие особенности функционирования СЭС промышленных потребителей нефтегазовой отрасли.

Цель диссертационной работы. Разработка математических моделей оценки надежности и текущего технического состояния СЭС потребителей нефтяного месторождения на основе риск-ориентированного подхода, обеспечивающих высокую эффективность управления техническим обслуживанием и ремонтами в течение эксплуатации электрооборудования

Поставленная цель достигается решением следующих **задач**:

1. Анализ существующих методов оценки надежности СЭС и оценки текущего технического состояния СЭС.
2. Обработка статистической информации об отказах электрооборудования СЭС для получения основных показателей надежности на примере Салымского месторождения;
3. Разработка математической модели технического состояния при оценке надежности СЭС.
4. Разработка математической модели оценки последствий отказов электрооборудования СЭС.
5. Разработка и реализация алгоритма поддержки принятия решений по выводу оборудования в ремонт.
6. Апробация математических моделей на примере СЭС Салымского месторождения.

Объект исследования – системы электроснабжения нефтяного месторождения.

Предмет исследования – методы и математические модели оценки последствий отказов электрооборудования с учетом надежности и текущего технического состояния СЭС.

Научная новизна заключается в следующем:

1. Предложен метод учета текущего технического состояния электрооборудования СЭС при оценке структурной надежности, поскольку расчеты, выполняемые без учета фактического состояния элементов системы, приводят к оптимистически завышенным оценкам надежности схем СЭС.
2. Предложен классификационный признак выделения потребителей электрической энергии, заключающийся в наличии доминирующего технологического процесса по выпуску однотипной продукции, на который приходится основная доля электропотребления, около 95 %, что обеспечивает возможность более обоснованной оценки ущерба при нарушениях электроснабжения.
3. Предложен способ оценки риска нарушения электроснабжения потребителей нефтяного месторождения. Ненадежность электроснабжения потребителя будет заключаться в появлении ущерба от последствий отказов системы электроснабжения. Ущерб для любого куста месторождения можно рассчитать в одном денежном эквиваленте, а именно: в стоимости недополученной нефти. Отказ электрооборудования является событием случайным, последствием отказа будет являться математическое ожидание

ущерба от недополученной продукции. Таким образом, под риском будет пониматься математическое ожидание ущерба от недополученной продукции.

4. Разработан риск-ориентированный алгоритм поддержки принятия решений о выводе электрооборудования СЭС в ремонт, основанный на совместном учете данных мониторинга текущего технического состояния и показателей надежности элементов СЭС. Алгоритм обеспечивает ранжирование оценок риска, оказывая поддержку в принятии решения при определении приоритетности ремонтных мероприятий в планах ТОиР.

Теоретическая значимость результатов диссертационного исследования заключается в развитии научно-методического аппарата оценки структурной надежности СЭС с учетом текущего технического состояния электрооборудования. Полученные результаты расширяют существующие методы анализа надежности электроснабжения за счет перехода от расчетов, основанных только на усредненных показателях надежности, к расчетам, учитывающим фактическое состояние элементов системы. Также теоретическая значимость работы состоит в формализации риска нарушения электроснабжения потребителей нефтяного месторождения через математическое ожидание ущерба от недополученной продукции. Такой подход позволяет установить взаимосвязь между отказами элементов СЭС, вероятностными характеристиками надежности, технологическими последствиями нарушения электроснабжения и экономическим ущербом от снижения добычи нефти.

Практическая значимость результатов исследования заключается в возможности применения предложенных методов и алгоритма при эксплуатации СЭС нефтяных месторождений. Разработанные положения позволяют выполнять более обоснованную оценку надежности схем электроснабжения, определять потребителей, для которых нарушение электроснабжения приводит к наибольшему технологическому и экономическому ущербу, а также ранжировать электрооборудование по уровню риска при планировании мероприятий ТОиР.

Практическая полезность результатов работы состоит в том, что предложенный риск-ориентированный алгоритм может использоваться эксплуатационными службами при формировании планов ремонта электрооборудования СЭС. Его применение позволяет учитывать не только показатели надежности элементов системы, но и данные мониторинга их текущего технического состояния, а также возможный ущерб от нарушения электроснабжения потребителей нефтяного месторождения.

Методология и методы исследования. Методологическую основу исследования составляют положения теории надежности электроэнергетических систем, теории риска и методов принятия решений в условиях неопределенности. При решении поставленных задач использованы методы теории вероятностей и математической статистики, методы анализа надежности СЭС, методы математического моделирования и статистического моделирования.

Для учета влияния текущего технического состояния электрооборудования на показатели надежности СЭС применены методы диагностического мониторинга и анализа эксплуатационных данных. Моделирование процессов изменения технического состояния оборудования и оценки рисков нарушений электроснабжения выполнено с использованием эвристических методов и метода статистического моделирования Монте-Карло.

Реализация разработанных математических моделей и алгоритмов выполнена с использованием современных средств вычислительной техники в виде программных модулей, объединенных в единый программный комплекс поддержки принятия решений при эксплуатации СЭС.

Положения, выносимые на защиту:

1. В системах электроснабжения монопотребителей (газовых и нефтяных месторождений), предназначенных для преимущественного электроснабжения данного типа потребителей оценка риска нарушения надежности в них должна осуществляться на основе расчета математического ожидания ущерба от перерыва электроснабжения. Возникший недоотпуск электроэнергии приводит к потери основного вида продукции (нефть, газ), который может быть корректно рассчитан.

2. Расчет риска непосредственно связан с оценкой вероятностного состояния элементов СЭС, которое представляет собой обязательное наложение текущего технического состояния элементов оборудования на оперативную схемную надежность СЭС.

3. Формируемая в темпе процесса управления шкала рисков нарушения надежности электроснабжения объектов (кустов месторождения) дает возможность организованного и упорядоченного производства технического обслуживания и ремонтов (ТОиР) в соответствии с реально сложившейся ситуацией в СЭС монопотребителя.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием математического аппарата, применением научно обоснованных методов диссертационного исследования. Показатели надежности элементов СЭС, используемые в расчетах, получены на основе обработки статистических данных об отказах электрооборудования рассматриваемых электрических сетей, что обеспечивает соответствие расчетных параметров условиям реальной эксплуатации.

Основные результаты и положения диссертации докладывались и обсуждались на различных всероссийских и международных конференциях с привлечением, в том числе, сотрудников службы эксплуатации электросетевых компаний.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта специальности 2.4.3 – Электроэнергетика:

п. 18 – «Разработка методов анализа структурной, балансовой и функциональной надежности электроэнергетических систем, систем электроснабжения, мини – и микрогрид»;

п. 20 – «Разработка методов использования информационных и телекоммуникационных технологий и систем, искусственного интеллекта в электроэнергетике, включая проблемы разработки и применения информационно-измерительных, геоинформационных и управляющих систем для оперативного и ретроспективного мониторинга, анализа, прогнозирования и управления электропотреблением, режимами, надежностью, уровнем потерь энергии и качеством электроэнергии».

Апробация результатов. Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на международных и всероссийских конференциях: Гидроэлектростанции в XXI веке. Всероссийская научно-практическая конференция, Черемушки, 2022, 2023; Progress through innovations. Proceedings 2023 International Academic and Research Conference of Graduate and Postgraduate Students, Novosibirsk, 2023; Борисовские чтения. Всероссийская (Международная) научно-техническая конференция, Красноярск, 2023, 2025; Наука. Технологии. Инновации. Всероссийская научная конференции молодых ученых, Новосибирск, 2025.

Публикации. По материалам диссертации опубликована 21 печатная работа, в том числе 5 – в рецензируемых изданиях из перечня, рекомендованных ВАК Российской Федерации, 1 – в изданиях, индексируемых в наукометрических базах Scopus и Web of Science, 3 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы, включающего 142 библиографические ссылки и 5 приложений. Текст диссертации изложен на 209 страницах, содержит 61 рисунок и 17 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении диссертационной работы представлена общая характеристика работы, показана актуальность, сформулирована цель и поставлены задачи исследования, отражена научная новизна, теоретическая и практическая значимость, сформулированы выносимые на защиту положения.

В первой главе выполнен анализ современных подходов к оценке надежности систем электроснабжения (СЭС) промышленных предприятий. Рассмотрены основные показатели надежности электроэнергетических систем, методы расчета схемной надежности, а также показатели надежности электроснабжения потребителей, которые применяют на практике при эксплуатации электрических сетей. Было показано, что методы расчета надежности СЭС, основанные на статистике отказов электрооборудования, как правило, не учитывают текущее техническое состояние элементов СЭС, что может приводить к неоправданно оптимистически завышенным оценкам при расчете надежности.

Проведен анализ факторов, влияющих на изменение технического состояния электрооборудования в процессе эксплуатации, включая развитие дефектов, режимы работы оборудования. Показано, что отсутствие

мониторинга текущего технического состояния оборудования и недостаток статистической информации о развитии дефектов существенно осложняют построение математических моделей, описывающих взаимосвязь между техническим состоянием оборудования и вероятностью его отказа.

Рассмотрены существующие методы диагностики и мониторинга технического состояния электрооборудования, а также современные подходы к применению предиктивных моделей и методов анализа данных. Установлено, что применение подобных моделей на практике ограничено недостатком архивных диагностических данных и высокой сложностью построения универсальных моделей деградации состояния оборудования. Несмотря на то, что сценарии последствий отказов электрооборудования в СЭС достаточно подробно изучены, в настоящее время отсутствуют математические модели, позволяющие установить явную зависимость между развитием дефектов в элементах электрооборудования и последующим отказом данного оборудования.

Вследствие этого затруднено формирование сценариев последствий отказов элементов СЭС на основе информации о текущем техническом состоянии оборудования.

На рис. 1 представлена структурная модель причинно-следственной связи между возникновением и развитием дефекта в элементе электрооборудования и его последующим отказом. Наиболее слабым звеном в данном процессе является отсутствие математической модели, описывающей влияние события 1 (дефекта оборудования) на событие 2 (отказ оборудования). Для ее получения отсутствует как детерминированная, так и статистическая информация, описывающая это влияние. Поэтому такая модель может быть построена на базе неопределенной информации. Она может быть получена различными эвристическими методами, которые основываются либо на аппарате экспертных оценок, либо на теории нечетких множеств.

Последствия отказов (событие 3) могут быть оценены отрицательным экономическим эффектом – ущербом. В зависимости от объекта могут быть составлены и рассмотрены различные сценарии, в которых отказ того или иного элемента приводит к определенным последствиям. Составив сценарии, появляется возможность дать оценку риска R отказа рассматриваемого элемента СЭС. Риск может быть представлен в виде денежного эквивалента (ущерба). Появляется «цена» отказа рассматриваемого элемента. Различные сценарии могут быть рассмотрены ЛПР для принятия решения о выводе электрооборудования в ремонт. В качестве критерия минимизации при этом принимается минимум ущербов.

Показано, что для объектов с монопотреблением электрической энергии (например, кустов добывающих скважин нефтяных месторождений) последствия отказов электрооборудования могут быть напрямую связаны с потерями выпуска продукции. Это позволяет использовать риск-ориентированный подход (РОП) для принятия решений по управлению в течение эксплуатации электрооборудования.

На основе проведенного анализа обоснована необходимость разработки математических моделей, позволяющих учитывать как текущее техническое состояние электрооборудования, так и схемную надежность СЭС при принятии решений о выводе оборудования в ремонт.



Рисунок 1 – Причинно-следственная связь между дефектами и отказами элементов СЭС

Во второй главе проводилось исследование текущего технического состояния электрооборудования СЭС кустов нефтяного месторождения. Были рассмотрены вопросы мониторинга и оценки технического состояния.

Интегральным показателем текущего технического состояния оборудования является индекс технического состояния (ИТС) единицы электрооборудования $I_{эл.об}$, расчет которого происходит путем сложения значений ИТС каждого функционального узла с учетом их весовых коэффициентов. Значение $I_{эл.об}$ может принимать значения в диапазоне от наихудшего – 0 до наилучшего – 1, однако в ходе эксплуатации оборудования данный показатель всегда принимает значение менее 1.

Техническое состояние разных деталей и функциональных узлов оказывает неравное влияние на элемент СЭС. Чтобы оценить важность (значимость) детали или функционального узла в составе единицы электрооборудования применяются весовые коэффициенты значимости V . Данные коэффициенты могут быть получены с помощью процедуры экспертных оценок. Значение ИТС элемента СЭС может быть получено с помощью математической модели (1).

$$I_{k.un.eq} = \sum_1^j V_j \times (\sum_1^i V_i \times O_i), \quad (1)$$

где V_i – весовой коэффициент значимости детали; O_i – весовой коэффициент (оценка) состояния детали; V_j – весовой коэффициент значимости функционального узла; i – количество деталей в составе функционального узла;

j – количество функциональных узлов в составе элемента СЭС.

Структурная схема единицы оборудования приводится на рис. 2.

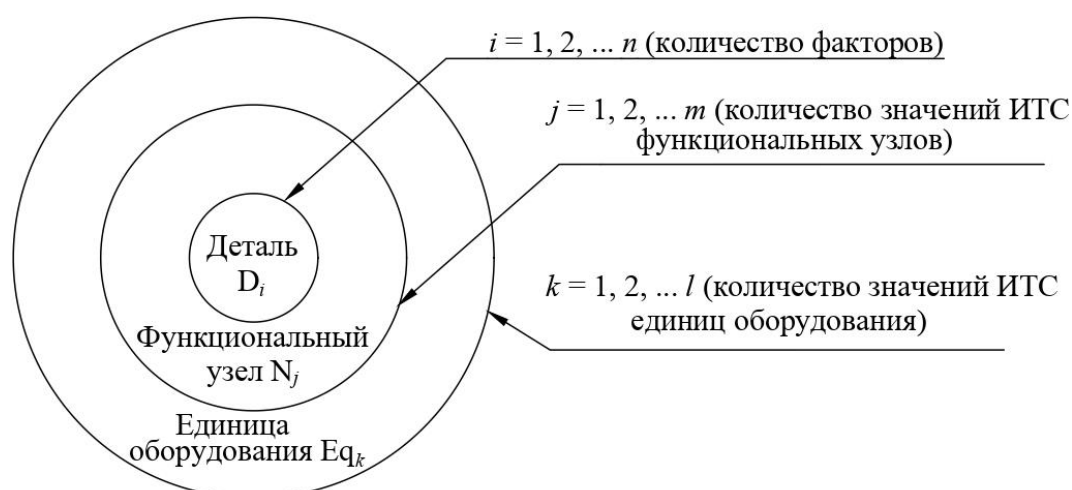


Рисунок 2 – Структурная схема единицы оборудования

Применяя информацию о техническом состоянии деталей, может быть получено значение ИТС единицы электрооборудования. Данная информация может быть получена путем мониторинга за техническим состоянием электрооборудования, помимо этого информация может быть получена с помощью процедуры экспертных оценок или с помощью моделирования.

Приведем пример для воздушной ЛЭП-35 на рис. 3.

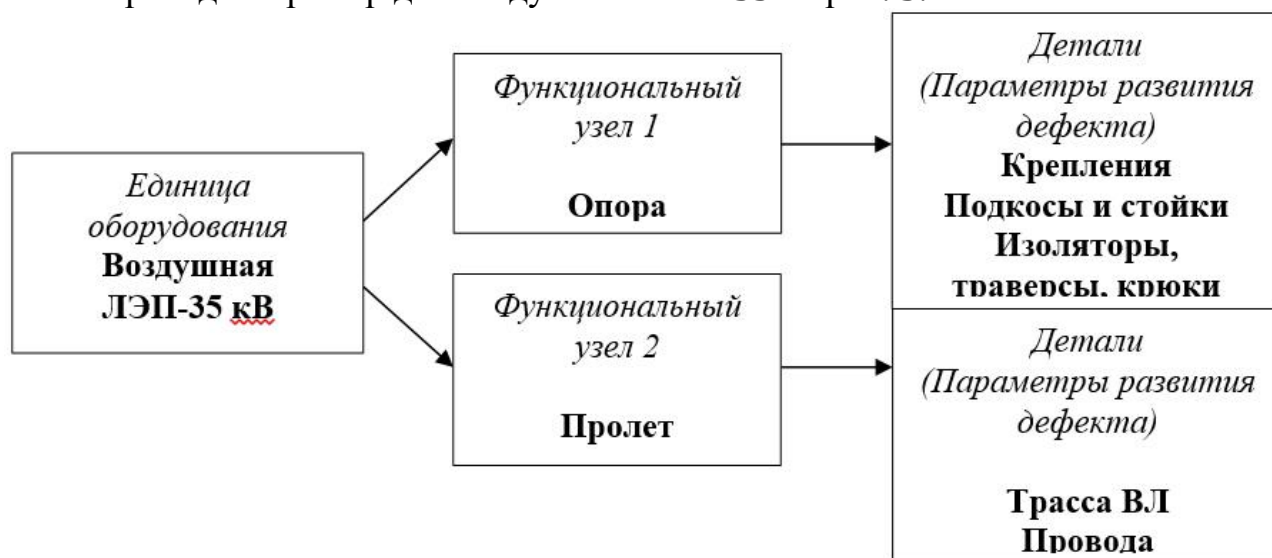


Рисунок 3 – Структурная схема единицы оборудования ЛЭП-35

Ограниченность статистических данных о техническом состоянии электрооборудования объекта обуславливает необходимость моделирования ИТС. Алгоритм моделирования может быть построен на методе Монте-Карло. Для каждого рассматриваемого параметра (фактора) необходимо определить количество испытаний (циклов). Количество циклов минимум может равняться единице. Во время прохождения через цикл происходит срабатывание генератора псевдослучайных чисел и счетчик цикла увеличивается на единицу. Предложенная математическая модель (2) мониторинга технического состояния

электрооборудования, позволяет учитывать влияние отдельных элементов и функциональных узлов на общий индекс технического состояния оборудования.

$$I_{\text{эл.об}} = \sum_1^i \left(\left(\frac{\sum_1^n \text{RANDOM}_i}{n} \right) \times \text{KB}_i \right) \quad (2)$$

где *RANDOM* – генератор псевдослучайных чисел для диапазона [0;1]; *n* – количество испытаний, *KB_i* – весовой коэффициент.

Для исследования модели были проанализированы все рассмотренные схемы электроснабжения объекта исследования и выбраны несколько типовых вариантов.

В исследуемой модели независимыми случайными величинами является генерируемые оценки функциональных узлов электрооборудования. Каждая величина подчиняется равномерному закону распределения.

Результат проверки по критерию согласия Пирсона позволил не отвергнуть выдвинутые гипотезы о нормальном распределении случайной величины при моделировании различных вариантов схем. Центральная предельная теорема подтверждает полученные результаты при моделировании текущего технического состояния систем электроснабжения. Значение ИТС имеет накопительный характер. При моделировании значений мониторинга за техническим состоянием электрооборудования математическое ожидание общего показателя ИТС снижается при большем количестве учтенного оборудования. Совмещенная гистограмма для рассматриваемых типов приводится на рис. 4.

При моделировании значений мониторинга за техническим состоянием электрооборудования математическое ожидание общего показателя ИТС снижается при большем количестве учтенного оборудования.

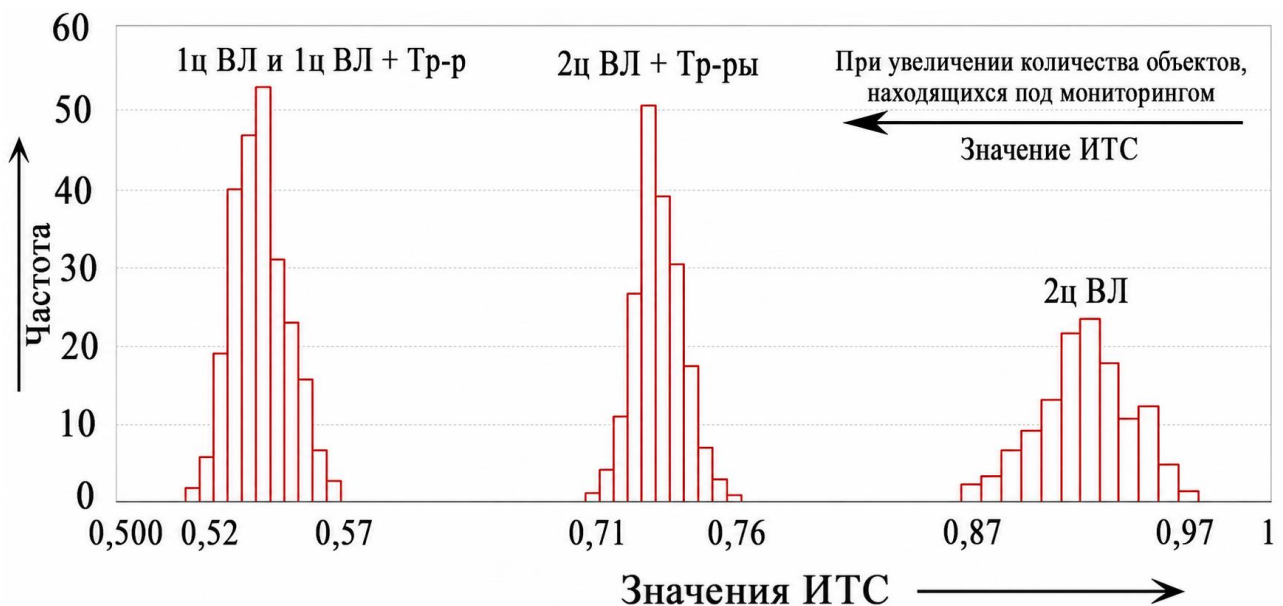


Рисунок 4 – Совмещенная гистограмма частот

Для моделирования изменения технического состояния элементов СЭС и анализа его влияния на показатели надежности системы был разработан программный комплекс.

В третьей главе разработаны модели оценки надежности систем электроснабжения монопотребителей с учетом мониторинга технического состояния электрооборудования. Проведена обработка статистической информации об отказах элементов СЭС на основе эксплуатационных данных за 11 лет эксплуатации. На основе статистики отказов воздушных линий электропередачи выполнен расчет основных показателей надежности, включая параметр потока отказов и среднее время восстановления:

$$\omega = \frac{\omega_{5\text{км}}}{5} = \frac{0,0904}{5} = 0,01808 \text{ год}^{-1}, \quad T_{\text{в}} = \frac{\sum_{i=1}^m t_i}{410} = 3,94 \text{ ч}.$$

Рассмотрены схемы электроснабжения объектов нефтедобычи и выполнен анализ их схемной надежности. Разработана математическая модель расчета надежности СЭС монопотребителей с учетом ограничений пропускной способности элементов и текущего технического состояния оборудования.

$$\begin{aligned} P_{\text{ИТС.огр}} &= (P_{\text{огр1}} + P_{\text{огр2}} + P_{\text{огр3}}) \times J_{k.un.eq} = \\ &= (e^{-\omega^I \times T} + e^{-\omega^{II} \times T} + e^{-\omega_{\Sigma} \times T}) \times J_{k.un.eq}, \end{aligned} \quad (3)$$

где $P_{огр1}, P_{огр2}$ – вероятности безотказной работы схем СЭС соответствующие 1 и 2 состоянию; ω^I, ω^{II} – параметры потока отказов соответствующие 1 и 2 состоянию год^{-1} ; $J_{k.un.eq}$ – индекс технического состояния электрооборудования; ω_{Σ} – параметр потока отказов эквивалентных элементов СЭС без ОПС, год^{-1} ; T – время, за которое рассматривается событие, год.

Предложен алгоритм автоматизированного расчета схемной надежности и реализована программная реализация для выполнения соответствующих расчетов. Схематично работа программного комплекса изображена на рис. 5

Учет пропускной способности позволяет перейти от упрощённой структурной оценки «работоспособна/неработоспособна» к более корректной оценке состояния системы, учитывающей реальные эксплуатационные ограничения. Стоит отметить, что в отличие от параметра потока отказов элементов системы, время восстановления вышедшего из строя оборудования практически не зависит от учёта ограничений по пропускной способности и текущего технического состояния электрооборудования.

При выполнении расчетов наименьшие значения вероятности безотказной работы наблюдаются при совместном учете индекса технического состояния электрооборудования, а также ограничений пропускной способности элементов.

Существенное влияние на снижение вероятности безотказной работы оказывает техническое состояние системы. Переход к ремонтным и послеаварийным режимам может приводить к изменению структуры схемы и снижению уровня резервирования, что увеличивает вероятность нарушения электроснабжения.

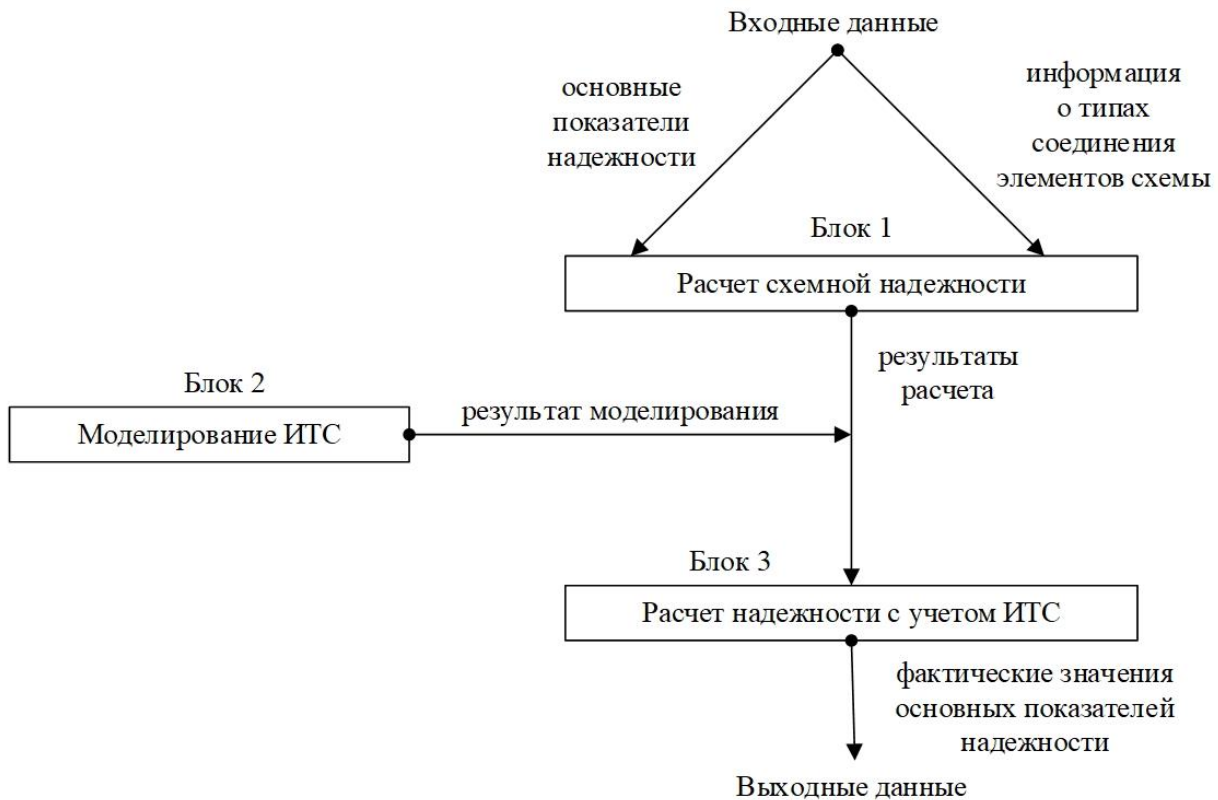


Рисунок 5 – Схема работы блока программы

Текущее техническое состояние при учете в расчетах также оказывает большее влияние на снижение общей схемной надежности рассматриваемой схемы, что подтверждается расчетами. Расчеты, проводимые без учета данных о мониторинге технического состояния оборудования и данных о частичном резервировании приводят к завышенным оптимистическим оценкам надежности.

Для автоматизированного расчета необходимо иметь информацию об основных показателях надежности и типе соединений. Программа определяет тип соединения с помощью условного «входа-выхода» элемента. Каждый элемент имеет свой индекс на «входе» и «выходе», если два и более элемента имеют одинаковый индекс на «входе-выходе», то данные элементы соединены параллельно и являются резервируемыми. Элементы, имеющие уникальные индексы, соединены последовательно.

Реализация разработанных математических моделей и алгоритмов выполнена с использованием современных средств вычислительной техники в виде программных модулей, объединенных в единый программный комплекс поддержки принятия решений при эксплуатации СЭС.

Программный комплекс позволяет получить интегральную оценку надежности СЭС с учетом текущего технического состояния оборудования и с учетом возможных ограничений пропускной способности элементов. Программный комплекс реализован в виде совокупности взаимосвязанных функциональных блоков, каждый из которых предназначен для решения отдельной расчетной задачи в рамках общей процедуры анализа СЭС.

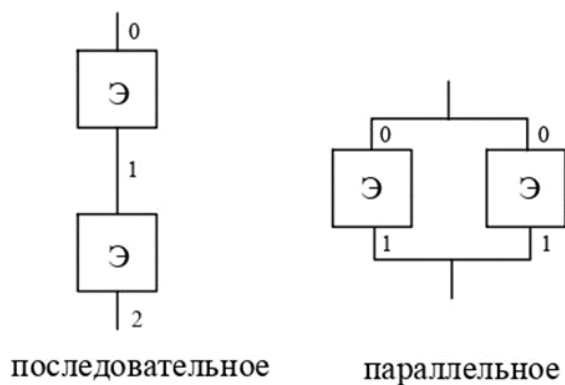


Рисунок 6 – Обозначение типов соединений в программном комплексе

Перед началом расчета программа присваивает каждому элементу индекс «входа-выхода». По назначенному индексу производится преобразование всех параллельных элементов в эквивалентные, далее происходит преобразование всех последовательных элементов в один эквивалентный элемент, показатели которого характеризуют надежность всех схемы электроснабжения относительно рассматриваемого потребителя (рис. 6).

В четвертой главе разработаны модели поддержки принятия решений на основе риск-ориентированного подхода для систем электроснабжения монопотребителей.

Куст состоит из ряда скважин. Статистика по выходу из строя оборудования на каждой скважине часто отсутствует. Для решения данной задачи вводятся следующие допущения:

1. Единичная скважина представляет собой электроприемник определенной мощности (ступень мощности), принятой для удобства расчетов. Каждая единичная скважина идентична по своим функциональным и электротехническим свойствам. В качестве потребителя выступает питающая подстанция.

При отсутствии информации по отказам скважного оборудования на кустах нефтедобывающих предприятий расчет ущербов может быть произведен при для простейшего случая при известной мощности трансформаторов, установленных на питающей подстанции. Следовательно:

2. Количество скважин определяется мощностью подстанции, т.е согласно выражению (4).

$$n_{скв} = \frac{P_{ПС}}{P_{скв}} \quad (4)$$

Принимается расчетная ступень мощности скважины, равная минимальной мощности оборудования, установленного на рассматриваемом кусте скважин.

3. Каждая скважина на нефтедобывающем кусте является самостоятельной независимой единицей оборудования. Следовательно, работа каждой скважины не влияет на работу соседних. При создании математической модели этот факт может говорить о независимости событий на рассматриваемых скважинах. Рассматривая несколько скважин, каждая будет рассмотрена отдельно от других. Это означает, что результат ожидаемого

события (отказ) не зависит от возникновения или отсутствия отказа на ранее рассмотренных скважинах. Если статистически известна вероятность отказа, то данное значение может быть применено в математической модели, основанной на формуле Бернулли.

В случае, если на объекте несколько свободных ремонтных бригад, но их количество меньше одновременно вышедших из строя единичных скважин, то процесс ремонта следует разбить на несколько «волн» согласно формуле (5).

$$k = \frac{m}{b} \quad (5)$$

где b – количество свободных бригад в момент выхода из строя единичных скважин; k – количество «волн» необходимых для полного восстановления всех единичных скважин.

Коэффициент оставшихся единичных скважин рассчитывается по формуле (6) при этом $1 \leq a \leq b$.

$$a = m - b(k - 1) \quad (6)$$

Тогда математическая модель принимает вид (7):

$$M(Y) = \left(b \frac{(k-1)k}{2} + ak \right) \times P_{\text{ст.нагр}} \times T_{\text{в}} \times D \times c \times \\ \times \left(\frac{n!}{m!(n-m)!} q^m p^{n-m} \right) \quad (7)$$

где c – удельная стоимость потерь, руб/тонн; Q – вероятность отказа схемы электроснабжения; D – производительность скважин, тонна/кВт×ч; b – количество свободных бригад в момент выхода из строя единичных скважин; k – количество «волн» необходимых для полного восстановления всех единичных скважин.

Появляется зависимость объема недоотпущенной электроэнергии от доступности ремонтных бригад (рис.7).

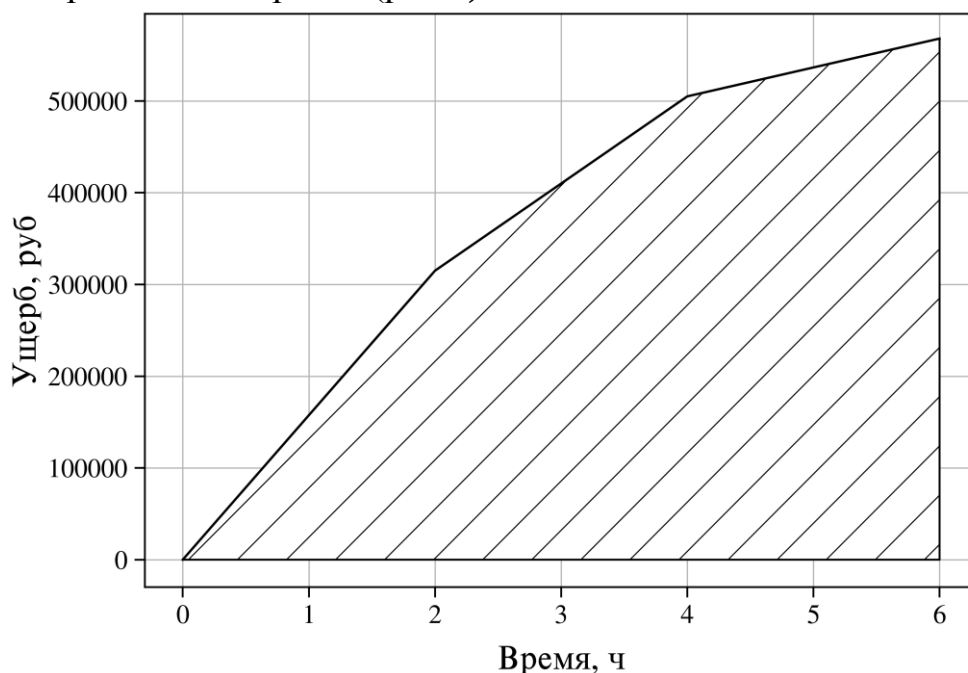


Рисунок 7 – Накопленный ущерб за время восстановления куста скважин

За время ремонта скважин растет количество недоотпущенной электроэнергии, которая могла быть использована для производства продукта. При отсутствии свободных бригад увеличивается продолжительность восстановления электроснабжения, поскольку ремонтные ресурсы заняты устранением других отказов, что приводит к росту суммарного объема недоотпущенной электроэнергии.

Были рассмотрены методы оценки экономических ущербов, возникающих вследствие нарушений электроснабжения промышленных потребителей. Проанализированы технологические и энергетические особенности нефтедобычи как примера монопотребителя электрической энергии. Предложен способ оценки рисков нарушений электроснабжения на основе математического ожидания ущерба от недоотпуска электрической энергии. Разработана модель оценки ущерба для кустов нефтедобывающих скважин и алгоритм поддержки принятия решений о выводе электрооборудования в ремонт на основе данных мониторинга технического состояния и показателей надежности элементов СЭС.

Расчет ущербов (рисков) осуществляется по каждому n -ому кусту, состоящему из m скважин. Результатом расчетов будет являться ранжированная шкала ущербов по всем кустам месторождения с целью первоочередного осуществления ТОиР на том кусте, где риск нарушения электроснабжения является самым высоким.

На основе разработанных моделей реализован программный комплекс поддержки принятия решений. Функциональная структура программного продукта включает несколько расчетных модулей, реализованных в виде самостоятельных блоков пользовательского интерфейса:

1. Модуль расчета схемной надежности, обеспечивающий оценку показателей надежности системы электроснабжения как с учетом ограничений по пропускной способности элементов, так и без их учета. Это позволяет анализировать влияние топологии сети и режимных ограничений на схемную надежность.

2. Модуль моделирования данных мониторинга технического состояния электрооборудования, реализующий обработку и формирование диагностических параметров, характеризующих уровень износа оборудования.

3. Модуль количественной оценки риска, в рамках которого риск определяется как тяжесть последствий для СЭС от отказа оборудования. При этом вероятность отказа формируется на основе показателей надежности и данных мониторинга технического состояния.

4. Модуль ранжирования элементов системы по уровню риска, позволяющий идентифицировать наиболее критичные элементы и формировать обоснованные приоритеты корректирующих воздействий на оборудование.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Проведенный анализ 72 схем электроснабжения месторождений выявил 11 типовых схем, которые были использованы для расчетов оперативной надежности системы электроснабжения.

2. На основе обработки многолетней статистической информации были получены достоверные показатели надежности (параметр потока отказов и время восстановления) основных элементов системы электроснабжения реального месторождения, которые использовались в расчетах для оценки оперативной надежности СЭС.

3. На основе анализа существующих методов оценки надежности СЭС установлено, что использование основных показателей надежности без учета текущего технического состояния электрооборудования приводит к завышенной оценке надежности. Для корректного решения предложен способ учета технического состояния элементов СЭС на основе индекса технического состояния, позволяющего корректировать параметры надежности оборудования. На примере СЭС конкретного месторождения показано, что учет текущего технического состояния приводит к снижению вероятности безотказной работы. Наибольшее снижение вероятности безотказной работы – 17% произошло на кусте №356 по сравнению с расчетом без учета текущего технического состояния.

4. Разработаны математические модели мониторинга технического состояния и расчета схемной надежности СЭС, основанные на совместном учете структурной надежности и текущего технического состояния элементов. Для моделирования изменения технического состояния деталей оборудования применен метод статистических испытаний, что позволило получить вероятностные оценки состояния элементов СЭС на рассматриваемый момент времени. Проверка гипотезы по критерию χ^2 – Пирсона для всех кустов месторождения показала, что случайные изменения значения ИТС электрооборудования подчиняется нормальному закону распределения. Полученные результаты согласуются с положениями центральной предельной теоремы, что подтверждает корректность применения метода статистических испытаний при моделировании технического состояния элементов СЭС.

5. Предложен способ оценки риска нарушения электроснабжения потребителей с доминирующим технологическим процессом, при котором риск определяется как математическое ожидание ущерба от недоотпуска продукции вследствие нарушения электроснабжения с учетом вероятности отказов и технического состояния элементов СЭС. Для исследуемого объекта установлено, что нарушение электроснабжения приводит к недоотпуску продукции, который может быть выражен ущербом. Полученные значения риска позволили сформировать ранжированный ряд рисков. Наибольший риск возникает на кусте №449 и составляет 231675 тыс.руб, что больше в 16,8 раза, чем на кусте №112 с наименьшим риском 13831 тыс.руб.

6. Разработан алгоритм поддержки принятия решений о выводе электрооборудования СЭС в ремонт, обеспечивающий ранжирование элементов системы по уровню риска и формирование приоритетной программы ТОиР с учетом ограниченных финансовых ресурсов. На основе предложенных моделей создан программный комплекс, реализующий расчет надежности, моделирование технического состояния и оценку риска от нарушения электроснабжения. На отдельные модули получены свидетельства о

государственной регистрации программ для ЭВМ. Апробация выполнена на электрических сетях Салымской группы нефтяных месторождений, с получением результатов автоматизированного расчета надежности, моделирования текущего технического состояния элементов СЭС и оценок рисков по каждому рассматриваемому кусту месторождения.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:

1. Горшунов А. А. Моделирование технического состояния электрооборудования систем электроснабжения объектов нефтедобывающих предприятий с различными схемами питания / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов. // Известия Транссиба. - 2023. – № 3 (55). – С. 120–130.

2. Горшунов А. А. Разработка моделей технического состояния электрооборудования для расчетов надежности систем электроснабжения / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов. // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. – 2024. – № 4 (103). – С. 49–58.

3. Горшунов А. А. Разработка и исследование моделей оценки текущего технического состояния электрооборудования систем электроснабжения на основе рискориентированного подхода / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов. // Вести высших учебных заведений Черноземья. - 2024. – Т. 20, № 1. – С. 3–17.

4. Горшунов А. А. Модель корректирующих воздействий технического обслуживания и ремонтов на восстановительный процесс в системах электроснабжения / Ю. А. Секретарев, Д. А. Меняйкин, А. А. Горшунов // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. №4(110): С. 18-26.

5. Горшунов А. А. Сравнительный анализ значений удельных ущербов от недоотпуска электроэнергии, полученных различными исследователями / Ю. А. Секретарев, Б. Н. Мошкин, А. А. Горшунов, Д. А. Меняйкин // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2026. № 1(112). С. 9–16.

Публикации в изданиях, входящих в наукометрические базы данных Scopus и Web of Science:

6. Горшунов А. А. Модели текущего технического состояния электрооборудования для расчета надежности систем электроснабжения монопотребителей в рамках риск-ориентированного подхода / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. – 2025. – Т. 68, № 1. – С. 17–34.

Публикации в прочих изданиях:

7. Горшунов А. А. Моделирование технического состояния оборудования систем электроснабжения монопотребителей с учетом схемной надежности / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов, Д. А. Меняйкин // Вести высших учебных заведений Черноземья. – 2022. – Т. 18, № 3 (69). – С. 3–14.

Свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ:

8. Свидетельство №2022618655. Расчет надежности системы электроснабжения нефтяного промысла в рамках риск-ориентированного подхода / Секретарев Ю.А., Горшунов А.А. // зарегистр. 13.05.2022. -1 с.

9. Свидетельство №2024660036. Учет ограничений пропускной способности в расчетах надежности электроснабжения монопотребителей в рамках риск-ориентированного подхода / Секретарев Ю.А., Шульга Д.И., Горшунов А.А. // зарегистр. 12.04.2024. -1 с.

10. Свидетельство №2025667349. Модели выбора и принятия решений с учетом технического состояния и надежности систем электроснабжения / Секретарев Ю.А., Горшунов А.А. // зарегистр. 04.07.2025. -1 с.

Основные опубликованные материалы международных и всероссийских конференций:

11. Горшунов А.А. Разработка и реализация модели мониторинга технического состояния электрооборудования при оценке надежности объектов электроэнергетической системы / А.А. Горшунов, Ю.А. Секретарев // Гидроэлектростанции в XXI веке: сб. материалов X Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов, студентов и школьников. Саяно-Шушенский филиал СФУ. 2023. – С. 250-258.

12. Горшунов А.А. Разработка и исследование модели влияния технического состояния электрооборудования на надежность систем электроснабжения // Борисовские чтения: Материалы IV Всероссийской научно-технической конференции с международным участием. – Красноярск: СФУ, 2024. – С. 54-59.

13. Горшунов А.А. Математические модели учета текущего состояния электрооборудования в расчетах надежности систем электроснабжения нефтедобывающих предприятий / А.А. Горшунов, Д.И. Шульга // Наука и инновационные разработки – северу: Сборник материалов III Международной научно-практической конференции. Москва, 2024. – С. 142-146.

14. Горшунов А.А. Применение программного комплекса для моделирования технического состояния и автоматизированного расчета надежности систем электроснабжения / Ю. А. Секретарев, А. А. Горшунов. // Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики Всероссийская школа молодых ученых: сборник научных трудов. Севастополь, 2024. – С. 193-198.

15. Горшунов А.А. Модель принятия решения о выводе электрооборудования системы электроснабжения месторождения нефти / А.А. Горшунов, Ю.А. Секретарев, Д.А. Меняйкин // Борисовские чтения : материалы V Междунар. науч.-техн. конф. Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2026. – С. 60-65.

Отпечатано в типографии

Новосибирского государственного технического университета
630073, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, Тел./факс (383) 346–08–57.

Формат 60x84 1/16. Объем 1,25 п.л. Тираж 100 экз.

Заказ № Р-05678. Подписано в печать 31.08.2026 г.