

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующего кафедрой

_____ А.А. Ачитаев

подпись инициалы, фамилия

« ____ » _____ 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

**РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ
АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	_____	профессор кафедры ГГЭЭС <u>доктор технических наук</u> должность, ученая степень	<u>М.Ф. Носков</u> инициалы, фамилия
Выпускник	_____	Зам. начальника ПТО Филиала ПАО «Якутскэнерго» - Каскад Вилейских ГЭС	<u>П.А. Судаков</u> инициалы, фамилия
Рецензент	_____	<u>им. Е.Н. Батенчука</u> должность, ученая степень	<u>И.К. Кабаненко</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	_____		<u>А.А. Чабанова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020

АННОТАЦИЯ

К магистерской диссертации, студента 2 курса магистратуры Саяно-Шушенского филиала Сибирского Федерального Университета на тему «Разработка предложений по повышению надежности автономных энергетических систем».

В процессе написания диссертации был проведен анализ надежности автономных энергетических систем. Анализ надежности выполнен на примере автономных энергетических систем Крайнего Севера. В ходе анализа были выявлены причины отказов оборудования автономных энергетических систем, рассмотрена классификация аварийности энергоснабжения.

В работе рассмотрена структура автономных энергетических систем. Также приведены и рассмотрены методы оценки надежности оборудования автономных энергетических систем. Была изучена возможность совместной работы традиционных и возобновляемых источников энергии.

Ключевые слова: автономные энергетические системы; Крайний Север; дизельная электростанция; возобновляемые источники энергии; надежность; анализ.

АВТОРЕФЕРАТ

Магистерская диссертация на тему «Разработка предложений по повышению надежности автономных энергетических систем» содержит в себе 41 страницу текстового документа, 46 использованных источников, 8 иллюстраций, 5 таблиц.

Актуальность темы исследования. Согласно Энергетической стратегии России до 2030 года одним из приоритетов было обозначено развитие и модернизация автономных энергетических систем. На данный момент проблема надежности автономных энергетических систем становится одной из основных проблем. Оборудование изношено и нуждается в замене или модернизации. Также с развитием и внедрением ВИЭ стал актуальным вопрос применения ВИЭ в составе автономных энергетических систем. Для решения данного вопроса необходимо проанализировать надежность и аварийность автономных энергетических систем, имеющих в своём составе ВИЭ, и автономных энергетических систем, основанных на дизельных электростанциях.

Объект исследования: автономные энергетические системы Крайнего Севера.

Предмет исследования: характеристики надежности и безопасности автономных энергетических систем.

Цель работы: провести анализ надежности автономных энергетических систем и выдвинуть ряд предложений по её повышению.

Задачи:

- Провести анализ состояния автономных энергетических систем;
- Выявить основные причины аварийности и снижения надежности автономных энергетических систем;
- Изучить методы оценки и способы повышения надежности автономных энергетических систем;

Методы исследования: анализ, дедукция, классификация, обобщение.

Научная новизна и практическая ценность:

- Рассмотрена тенденция развития современной электроэнергетики России;
- Приведены основные причины отказов дизельных электростанций в децентрализованных зонах энергоснабжения. Также рассмотрены возможные сценарии возникновения аварийных ситуаций;
 - Приведены и проанализированы методы оценки надежности автономных энергетических систем;
 - Проведен анализ аварийности и возможный ущерб от неё;
 - Рассмотрена возможность резервирования электроэнергии в децентрализованных зонах энергоснабжения;
 - Рассмотрен вариант совместного использования дизельных электростанций и ВИЭ, что позволит повысить надежность автономных энергетических систем.
 - Предложен вариант использования автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ, что позволит не вредить экологии и уменьшить затраты.

Апробация работы: результаты по выполненной работе докладывались и обсуждались на конференциях: VI Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке»; VII Всероссийская научно-практическая конференция молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов «Гидроэлектростанции в XXI веке».

Публикации: по основным результатам опубликовано 2 печатные работы.

Структура работы: работа состоит из аннотации, автореферата, четырёх глав, списка использованных источников.

ABSTRACT

Master's thesis on "Development of proposals to improve the reliability of autonomous power systems" contains 41 pages of text document, 46 sources used, 8 illustrations, 5 tables.

Relevance of the research topic. According to the Energy Strategy of the Russian Federation until 2030, one of the priorities was the development and modernization of autonomous power systems. Now, the problem of the reliability of autonomous power systems is becoming one of the main problems. The equipment is worn and needs to be replaced or modernized. In addition, with the development and implementation of renewable energy sources, the issue of the use of renewable energy as a part of autonomous power systems has become urgent. To solve this issue, it is necessary to analyze the reliability and breakdown rate of autonomous power systems incorporating renewable energy sources and autonomous power systems based on diesel power plants.

Object of research: autonomous power systems of the Far North.

Subject of research: reliability and safety characteristics of autonomous power systems.

Purpose of work: to analyze the reliability of autonomous power systems and put forward a number of proposals to improve it.

Objectives:

- Analyze the state of autonomous power systems;
- Identify the main causes of accidents and reduce the reliability of autonomous power systems;
- To study methods and ways to improve the reliability of autonomous power systems.

Research methods: analysis, deduction, classification, generalization.

Scientific novelty and practical value:

- The development trend of modern electric power industry in the Russian Federation is considered;
- The main reasons for the failure of diesel power plants in decentralized energy supply zones are given. Possible scenarios for emergency situations are also considered;
- Methods for assessing the reliability of autonomous power systems are presented and analyzed;
- An analysis of accident rate and possible damage from it;
- Considered the possibility of backing up electricity in decentralized energy supply zones;
- Considered the option of joint use of diesel power plants and renewable energy sources, which will improve the reliability of autonomous power systems;
- The option of using autonomous power systems based on renewable energy sources is proposed, which will allow not harming the environment and reducing costs.

Approbation of the work: the results of the work were reported and discussed at the conferences: VI All-Russian scientific and practical conference of young scientists, specialists, postgraduates and students “Hydroelectric Power of the XXI Century”; VII All-Russian scientific and practical conference of young scientists, specialists, postgraduates and students “Hydroelectric Power of the XXI Century”.

Publications: the main results published two printed works.

The structure of the work: the work consists of annotation, abstract, four chapters, a list of sources used.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	8
1 Безопасность энергосистем и современные направления развития энергетики России.....	9
1.1 Значение электроэнергетики в экономике России	9
1.2 Безопасность энергосистем России.....	9
1.3 Тенденции развития современной электроэнергетики России.....	11
2 Методы оценки надежности автономных энергетических систем.....	13
2.1 Автономные энергетические системы	13
2.2 Общая характеристика проблемы надежности автономных энергетических систем	14
2.3 Аварийность автономных энергетических систем.....	15
2.4 Надёжность энергетических систем	16
2.5 Оценка надежности автономных энергетических систем	18
3 Оценка состояния надежности автономных энергетических систем Крайнего Севера.....	20
3.1 Энергоснабжение Крайнего Севера.....	20
3.2 Аварийность энергоснабжения Крайнего Севера и её классификация.....	21
3.3 Анализ надежности энергоснабжения Крайнего Севера.....	24
3.4 Резервирование надежности энергоснабжения Крайнего Севера	24
4 Влияние ВИЭ на повышение надежности автономных энергетических систем Крайнего Севера.....	28
4.1 ВИЭ в составе автономных энергетических системах	28
4.2 Причины отказов оборудования автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ	30
4.3 Задачи анализа надежности автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ	33
4.4 Работоспособность автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ.....	33
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	36

ВВЕДЕНИЕ

Энергетическая стратегия России на период до 2030 года [3] обозначила одним из приоритетных направлений – развитие автономных энергетических систем, основанных на возобновляемых источниках энергии.

Необходимо развивать и совершенствовать автономные энергетические системы, но при этом не забывать о таком понятии как «надежность». Требуется развивать и улучшать методы оценки и анализа надежности, а также методы расчета данного параметра.

На данный момент расчет и первичный анализ надежности является частью обязательных работ на этапе проектирования энергетического оборудования.

Условия Крайнего Севера были выбраны исходя из того, что большая часть Крайнего Севера находится на территории зон децентрализованного энергетического снабжения. На данной территории распространены автономные энергетические системы разных видов: дизельные электростанции, гибридные электростанции, солнечные электростанции и т.д.

Данная работа посвящена рассмотрению методов расчета надежности, анализу надежности и аварийности электрооборудования автономных энергетических систем в условиях Крайнего Севера.

1 Безопасность энергосистем и современные направления развития энергетики России

1.1 Значение электроэнергетики в экономике России

Электроэнергетика является одной из ключевых отраслей в экономике России. Надежность, работа без перебоев и эффективность электроэнергетики является основой развития экономики и жизнеобеспечения. Являясь частью топливно-энергетического комплекса (ТЭК), электроэнергетика влияет на состояние и перспективы развития российской экономики.

При развитии данной отрасли необходимо грамотно разместить объекты электроэнергетического хозяйства. Необходимо учитывать потребности населения, производства и других отраслей экономики и вести работы на перспективу.

1.2 Безопасность энергосистем России

Согласно Указа Президента Российской Федерации №216 от 13.05.2019г. была утверждена Доктрина энергетической безопасности России (далее – Доктрина), в которой написано, что «Доктрина – это документ, в котором сформулировано стратегическое планирование в сфере обеспечения национальной безопасности Российской Федерации (РФ)» [4].

В данном документе понятие «энергетическая безопасность» формулируется следующим образом:

«Энергетическая безопасность – это состояние защищенности экономики и населения страны от угроз национальной безопасности в сфере энергетики, при котором обеспечивается выполнение предусмотренных законодательством РФ требований к топливо- и энергоснабжению потребителей, а также выполнения экспортных контрактов и международных обязательств РФ» [4].

В целом единого понятия «энергетическая безопасность» нет. Разные источники определяют данное понятие по-разному:

- Энергетическая независимость государства;
- Характеристика ТЭК;
- Защита граждан и государства от дефицита энергии и топлива;
- Условия, необходимые для недопущения дефицита энергии и т.д.

Согласно Доктрине [4] внутренними угрозами энергетической безопасности РФ являются:

- Несоответствие возможностей ТЭК потребностям социально-экономического развития РФ (дефицит или избыток энергетических мощностей и инфраструктуры ТЭК)
 - Снижение качества минерально-сырьевой базы для ТЭК;
 - Недостаточная обеспеченность организаций ТЭК трудовыми ресурсами, высококвалифицированным персоналом;
 - Рост количества преступлений и правонарушений в сфере энергетики;
 - Рост количества нарушений в сфере трудовых отношений в организациях ТЭК, жилищно-коммунального хозяйства (ЖКХ) и транспорта.

Целью энергетической безопасности РФ является поддержание защищенности экономики и граждан России от угроз энергетической безопасности.

Ключевыми направлениями деятельности по обеспечению энергетической безопасности являются:

- Улучшение обеспечения энергетической безопасности в области государственного управления;
- Сохранение минерально-сырьевой базы ТЭК и основных производственных фондов организаций ТЭК;
- Совершенствование территориально-производственной структуры ТЭК;
- Обеспечение технологической независимости ТЭК и поддержание его конкурентоспособности.

1.3 Тенденции развития современной электроэнергетики России

Территория России имеет обширные территории с разными климатами и обеспечением электроэнергией. Одной из особенностей электроэнергетики России является наличие Единой энергетической системы (ЕЭС). ЕЭС России представляет собой совокупность объединенных энергосистем (ОЭС), которые объединены между собой и имеют общий режим работы и диспетчерское управление [1]. Однако, в России очень много регионов, находящихся в зоне децентрализованного энергоснабжения (Рисунок 1).



Рисунок 1 – Схема энергоснабжения России

Идея централизации электроэнергетики была основой плана ГОЭРЛО (Государственная комиссия по электрификации России), в рамках которого объекты электроэнергетики строились с учетом того, чтобы обеспечить электроэнергией не только ближайшее поселение или объект производства, но и его окрестности [2].

В состав зон децентрализованного энергоснабжения входят регионы, расположенные на Крайнем Севере или на приравненных к нему территориях. Для

данных территорий характерно: неблагоприятные климатические условия; низкий уровень инфраструктуры; недостаточное обеспечение топливными запасами; нечастой модернизацией объектов электроэнергетики, что приводит к их низким показателям надежности.

Согласно распоряжению Правительства Российской Федерации (РФ) №1-р от 08.01.2009г. «Об использовании возобновляемых источников энергии», а также в соответствии с федеральным законом №261-ФЗ от 23.11.2009г. «Об энергосбережении и о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» [10] было решено улучшить эффективность генерации, уменьшить стоимость электроэнергии и частоту отказов оборудования дизельных электростанций (ДЭС) с помощью создания автономных энергетических систем (АЭС), использующих возобновляемые источники энергии (ВИЭ).

В России есть множество предпосылок для развития АЭС на основе ВИЭ, а именно:

- Россия обладает одним из крупнейших объемом ресурсов ВИЭ;
- Имеется дефицит электроэнергии в зонах децентрализованного энергоснабжения;
- Государство заинтересовано в ВИЭ и старается всячески поддерживать проекты, связанные с ВИЭ;
- Объекты электроэнергетики в децентрализованных зонах энергоснабжения нуждаются в модернизации.

Однако, несмотря на выше упомянутое, также имеют место быть проблемы, которые ещё не решены или находятся на стадии решения [3]:

- Сильная изношенность производственных фондов;
- Зависимость от импорта некоторых видов оборудования, материалов и услуг;
- Ухудшения ресурсной топливной базы;
- Небольшая поддержка малой энергетики.

2 Методы оценки надежности автономных энергетических систем

2.1 Автономные энергетические системы

Автономные энергетические системы (АЭС) представляют собой систему, состоящую из источников и устройств преобразования электроэнергии. Среди АЭС наибольшее распространение получили дизельные электростанции (ДЭС), чья численность в децентрализованных зонах энергоснабжения составляет более 10 тысяч [5]. ДЭС состоят из нескольких дизель-генераторных установок (ДГУ) (Рисунок 2), в состав которых входят дизельный двигатель и генератор. Данная система оснащена системой запуска, системой подачи топлива, а также контрольно-измерительными приборами [6]. Также АЭС могут включать в себя:

- Источник электроэнергии, в том числе с применением ВИЭ;
- Устройства преобразования электроэнергии;
- Систему автоматического пуска генератора (САП);
- Блок коммутации;
- Аккумуляторные батареи (АКБ);
- Стабилизатор напряжения.

Однако, при отсутствии некоторых элементов данной подсистемы работа АЭС возможна, но с ограничениями [7].



Рисунок 2 – Дизель-генераторная установка

2.2 Общая характеристика проблемы надежности автономных энергетических систем

Большая часть ДЭС находятся в эксплуатации более 30 лет и на большинстве из них не были произведены работы по их реконструкции, что приводит к росту количества повреждений оборудования. Данный фактор снижает надежность оборудования и качество энергоснабжения.

АЭС периодически осматриваются и ежегодно на них производятся ремонтные работы, но этого недостаточно, учитывая опыт эксплуатации АЭС на основе ДЭС [8,9]. Причины отказов ДЭС можно разделить на несколько основных видов, которые происходят в условиях децентрализованного энергоснабжения (Таблица 1) [10].

Таблица 1 – Причины отказов ДЭС в децентрализованных зонах

Виды отказов	Причины отказов
Повреждения частей двигателя	Повреждения топливной аппаратуры
	Отмокание и загрязнение деталей, контактов
	Применение деталей разных марок
«Человеческий фактор»	Недостаток опыта
	Отсутствие необходимых знаний для эксплуатации оборудования
	Нехватка персонала
	Редкий осмотр оборудования
Выход из строя топливной аппаратуры	Низкокачественное топливо
	Подсос воздуха в топливной системе
Физическое изнашивание оборудования	«Старение» изоляции
	Продолжительный график работы, приводящий к большой нагрузке на электрооборудование
	Влияние низких температур на износ элементов оборудования
	Протекание смазки
	Повреждение системы отопления/охлаждения

Также имеет место быть другая важная проблема надежности АЭС – зависимость энергоснабжения от поставки топлива [9, 11, 12]. Данная проблема связана с такими факторами как:

- сезонный завоз топлива;
- удаленность поставщиков топлива от ДЭС;
- обособленное расположение ДЭС друг от друга;

Из-за дефицита и высокой цена на топливо во многих регионах становится невозможным круглосуточное электроснабжение с применением ДЭС [9].

2.3 Аварийность автономных энергетических систем

При эксплуатации автономных энергетических систем в условиях Крайнего Севере возникает ряд проблем, а именно:

- Сложная схема доставки топлива;
- Износ оборудования;

- Незрвитость электросетевой инфраструктуры: все автономные энергетические системы в условиях Крайнего Севера работают на свои распределительные электросети, охватывающие отдельный населенный пункт.

Проведенный анализ аварий показывает, что склонность к сохранению высоких значений риска аварий при эксплуатации автономных энергетических систем обусловлена [18]:

- Влиянием климата на особенность эксплуатации инженерных систем;
- Высоким износом энергетических систем;
- Низким уровнем развития системы управления эксплуатации электрических, водопроводных и тепловых сетей;
- Низким уровнем квалификации персонала («человеческий фактор»).

2.4 Надёжность энергетических систем

Надёжность энергетической системы - это комплексное свойство и определяется как способность энергосистемы выполнять функции по производству, передаче, распределению и снабжению потребителей электрической энергией путем взаимодействия генерирующих установок, электрических сетей и электроустановок потребителей, в том числе [13]:

- удовлетворять общий спрос на электроэнергию;
- препятствовать возмущениям, вызванным отказами элементов энергосистемы;
- восстанавливать свои функции после их нарушения.

Надёжность системы состоит из: адекватности системы [7] и безопасности системы (рисунок 3).



Рисунок 3 – Структурная схема оценки надежности

Оценка адекватности энергосистемы может проводиться на всех трех уровнях энергосистемы: производства, передачи и распределения (Рисунок 4).

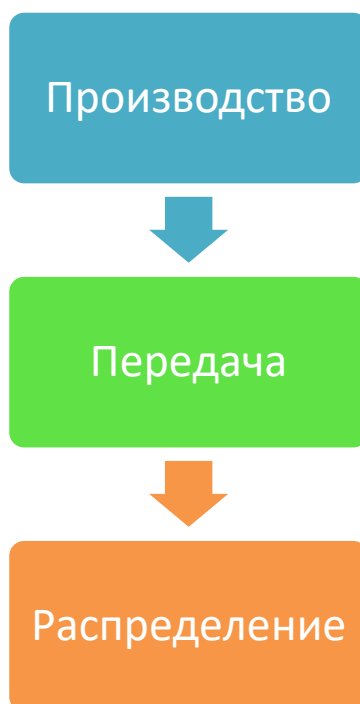


Рисунок 4 – Структура энергосистемы

На первом уровне рассматривается *производство электроэнергии*. Оценка надежности в данном случае рассматривается как оценка адекватности генерирующей мощности.

На втором уровне рассматривается *передача электроэнергии*. В данном случае оценивается способность системы доставить электроэнергию потребителю.

На третьем уровне рассматривается *распределение электроэнергии*. На данном уровне идет оценка всех трех уровней структуры энергосистемы. На практике очень трудно провести оценку надежности на третьем уровне энергосистемы из-за масштаба проблемы и сложностей при вычислении.

2.5 Оценка надежности автономных энергетических систем

Существует несколько методов оценки надежности, которые представлены в разных научных трудах. Данные методы можно разделить на несколько видов:

- Аналитический метод – в большинстве случаев представляет собой таблицу мощностей и связанных с ними вероятностей отключения [10].
- Метод пространства состояний – необходим для оценки состояния АЭС, состоящих из нескольких ветроэлектрических установок. Главным преимуществом данного является четкая картина всех состояний системы и переходов между этими состояниями [10].
- Метод дерева отказов – применяется [14,15] для оценки систем, основанных на ФЭП (фотоэлектрические преобразователи) и АБ (аккумуляторные батареи).
- Метод перебора состояний – применяется для количественной оценки показателей надежности АЭС на основе ФЭП [16,17].

В ходе оценки надежности АЭС также анализируют аварийные события, на основе которых составляются разные сценарии аварий и аварийных ситуаций в системе энергоснабжения в условиях Крайнего Севера [18]:

Штормовая погода → обрыв электролиний (или другие неисправности энергосистемы) → отключение подачи электроэнергии → остановка оборудования для подачи тепла и воды населению → в условиях низких температур →

промерзание теплосетей и систем водоснабжения → промерзание объектов жизнедеятельности → эвакуация населения.

На основе подобных сценариев аварий составляется дерево отказов системы электроснабжения (рисунок 5). По данной схеме можно оценить ситуацию и разработать комплекс мероприятий по недопущению аварий в дальнейшем, что приведет к повышению надежности работы автономных энергетических систем.

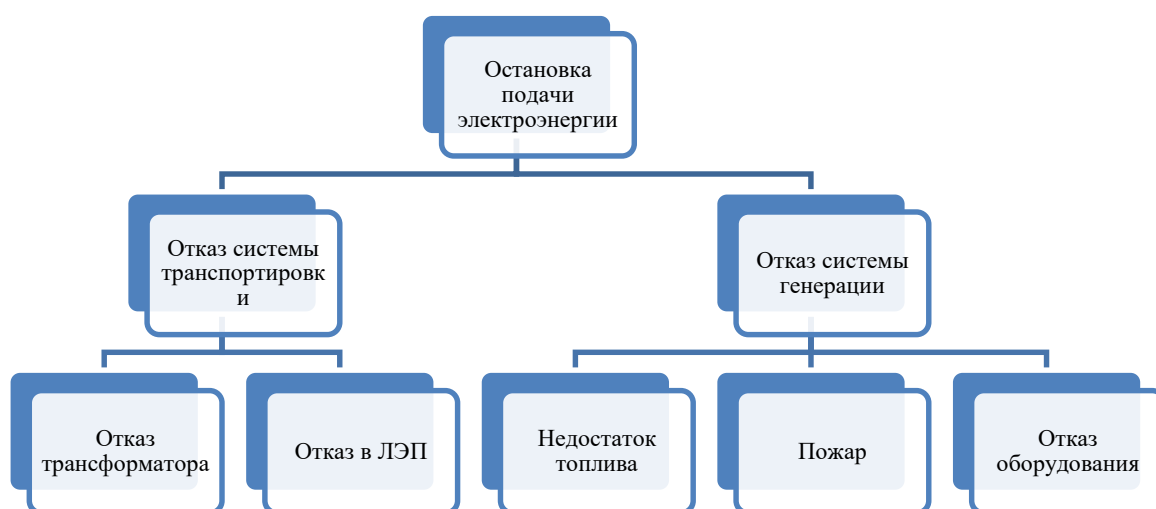


Рисунок 5 - Дерево отказов системы электроснабжения

3 Оценка состояния надежности автономных энергетических систем Крайнего Севера

3.1 Энергоснабжение Крайнего Севера

По данным Федеральной службы государственной статистики [19] к районам Крайнего Севера относятся следующие регионы: Республика Карелия, Республика Саха (Якутия), Республика Коми, Красноярский край (Таймырский автономный округ; Эвенкийский автономный округ; г. Норильск и подчиненные его администрации населенные пункты; Северо-Енисейский и Туруханский районы), Камчатский край, Хабаровский край (Аяно-Майский и Охотский районы), Архангельская область, Иркутская область (Катангский район), Тюменская область (Ямало-Ненецкий автономный округ), Мурманская область, Сахалинская область, Чукотский автономный округ и Магаданская область. Данные регионы похожи тем, что имеют большую удаленность от основных промышленных и финансовых центров России, а также на их территории присутствуют высокие производственные издержки, связанные с тяжелыми климатическими условиями.

Основная часть энергоснабжения северная территорий снабжается с помощью ДЭС. Средний расход топлива для ДЭС составляет от 350 до 500 тонн удельного топлива. Помимо ДЭС также имеются свыше 5 тысяч котельных, а также Кольская атомная электростанция (Мурманская область), Билибинская атомная электростанция, плавучая атомная теплоэлектростанция «Академик Ломоносов» (Чукотский автономный округ). Порядка 70% вырабатываемых мощностей приходится на не возобновляемые источники энергии – уголь, мазут, дрова, чей завоз на данные территории стоит немалых денег.

Проблемы в снабжении топливом ДЭС децентрализованных зон обусловлены рядом факторов:

- сложные логистические схемы – доставка с использованием нескольких видов транспорта (автомобильный, речной, морской);

- короткие сроки навигации и труднодоступность малых рек;
- необходимость создания запасов топлива и ресурсов.

3.2 Аварийность энергоснабжения Крайнего Севера и её классификация

Неблагоприятное воздействие АЭС и других объектов энергетики Крайнего Севера на окружающую среду и население является актуальной проблемой. Аварии, произошедшие за последние несколько лет и приведшие к значительному ущербу, ещё раз подтверждают актуальность данной проблемы. К примеру, на территории Республики Саха (Якутия) за период с 1998 по 2008 гг. произошло около 290 аварий [20, 21], ежегодно происходит порядка 30-ти аварий и их интенсивность растет в осенне-зимний период.

Основной причиной аварий является отказ оборудования. К отказу оборудования может привести его износ или повреждения технических систем, выход из строя элементов оборудования, а также отсутствие или неподготовленность резервных систем. В редких случаях к отказу приводит нехватка топлива, использование некачественного топлива и т.д.

Также на аварийность влияют и климатические условия. Штормовой ветер может привести к обрыву линий электропередачи. Низкие температуры приводят к промерзанию систем тепло- и водоснабжения. В некоторых случаях аварии взаимосвязаны, что приводит к синергетическому эффекту [22]. Немаловажным фактором аварийности является «человеческий фактор» - низкая квалификация обслуживающего персонала.

Все нарушения в работе АЭС и систем энергоснабжения можно разделить на несколько основных элементов: повреждения, аварии, катастрофа [23, 24, 25]. В общих случаях повреждение рассматривается как событие, в процессе которого происходит нарушение исправного состояния оборудования при сохранении его работоспособности. Повреждение оборудования может привести к его отказу. Отказы при аварийных событиях классифицируются по степени тяжести.

Авторы некоторых работ [26, 27] в своих трудах описывают анализ аварийных событий, их классификацию и вероятность их возникновения.

Основываясь на приведенные выше работы, а также на основании постановления Правительства РФ «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [28] аварийные события можно разделить на несколько классов (Таблица 2). Каждому классу соответствуют четыре параметра, которые основаны на непрерывных множествах состояний и характеризующих последствий: x_1 – число пострадавших; x_2 – число людей, у которых нарушены условия жизнедеятельности; x_3 – размер материального ущерба (в единицах МРОТ); x_4 – размер зоны распространения поражающих факторов аварийных событий [18]. Для каждого параметра имеются ограничения.

Таблица 2 – Классификация аварийных событий

Параметр	Локальные	Местные	Территориальные	Региональные	Федеральные	Трансграничные
Число пострадавших, чел	$x_1 \leq 10$	$10 < x_1 \leq 50$	$50 < x_1 \leq 100$	$100 < x_1 \leq 500$	$x_1 > 500$	-
Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности, чел	$x_2 \leq 100$	$100 < x_2 \leq 300$	$300 < x_2 \leq 500$	$500 < x_2 \leq 1000$	$x_2 > 1000$	-
Ущерб, МРОТ	$x_3 \leq 1000$	$1000 < x_3 \leq 5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3 < x_3 \leq 5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5 < x_3 \leq 5 \cdot 10^6$	$x_3 > 5 \cdot 10^6$	-
Размеры зоны	$0 \leq x_{4л}$	$x_{4л} < x_4 \leq x_{4м}$	$x_{4м} < x_4 \leq x_{4т}$	$x_{4т} < x_4 \leq x_{4р}$	$x_{4р} < x_4 \leq x_{4ф}$	$x_4 > x_{4ф}$

3.3 Анализ надежности энергоснабжения Крайнего Севера

Автономные энергетические системы являются достаточно сложной системой. Для анализа надежности такой системы применяется несколько методов [29, 30, 31, 32]:

- используя статистику аварийных событий на однотипных объектах (произошедших в прошлом);
- графоаналитическое изучение структуры причинно-следственных связей факторов, приведших к аварии;
- способ экспертных оценок;
- экспресс-анализ наблюдаемых параметров функционирующего объекта.

На данный момент для районов Крайнего Севера применяется метод с использованием известной статистики. При недостатке данных используются данные по похожему оборудованию в других отраслях. Используя данные об отказах, данным методом можно определить вероятность возникновения аварийных событий и размер ущерба.

Также при анализе надежности энергоснабжения регионов Крайнего Севера активно используется метод дерева событий [18]. В процессе данного метода идет последовательный перебор развития возможных аварийных событий. Данный метод применяется преимущественно для анализа систем теплоснабжения и был предложен Л.С. Попыриным [22].

3.4 Резервирование надежности энергоснабжения Крайнего Севера

Одним из способов повышения надежности АЭС является резервирование. Согласно ГОСТ 27.002-83 резервированием называется использование дополнительных средств или возможностей с целью сохранения объекта при отказе его элементов. Для энергоснабжения и его систем данное понятие при-

меняют как повышение надежности объекта за счет введения понятия «избыточность» [33, 34, 35, 36]. Под избыточностью подразумевают дополнительные средства и возможности, выше необходимого минимума, для выполнения объектом заданных функций. В итоге отказ оборудования наступает только тогда, когда происходит отказ основных элементов и всех систем резервирования.

Надежность всего оборудования АЭС с учетом постоянного резерва определяется по формулам, описанным в работах ряда авторов [23, 29]:

$$P_c = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - P_i) = 1 - \prod_{i=0}^m Q_i, \quad (3.1)$$

где m – количество резервных элементов;

P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента;

Q_i – вероятность отказа i -го элемента.

Резервирование является основным способом для поддержания необходимого уровня надежности при недостаточно надежных элементах энергетической системы. Для данного случая применяется вероятностная модель и выбор резерва основан на условии не снижения надежности:

$$Q < Q_d, \quad (3.2)$$

где Q_d – пороговое значение допустимой надежности, которое принимается на уровне 10^{-5} .

В приведенном случае критерий надежности определен как системная надежность, при этом определенная в ходе расчета вероятность отказа должна быть меньше допустимого значения.

При наличии более сложного и дорогого оборудования систем генерации для резервирования применяется условие эффективности. Задачей резервирования является нахождение необходимого количества резерва, которое будет обеспечивать необходимый уровень надежности системы с наименьшими

затратами. Для принятия рационального решения по уровню резервирования необходимо определить объем средств, направляемых на увеличение надежности с экономическим эффектом. Для этого выбирается критерий оптимизации, так как резервирование – это трудо- материально затратный процесс.

Задача эффективности осуществляется при помощи условия минимума приведенных расходов, учитывая ущерб от недоотпуска электроэнергии потребителю [23, 30, 37, 38]:

$$Z = Z_{\Delta P} + Y \rightarrow \min, \quad (3.3)$$

где $Z_{\Delta P}$ – капиталовложения и ежегодные затраты на эксплуатацию в системе на установку в ней агрегатов мощностью выше необходимой, согласно баланса мощности;

Y – математическое ожидание ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителю при располагаемой мощности системы.

Существует несколько видов резервирования, применяемых в условиях Крайнего Севера (Рисунок 6).



Рисунок 6 – Виды резервирования

К нагрузочному резервированию относится увеличение мощности генераторов. Структурное резервирование применяется для подсистем системы энергоснабжения. Также структурное резервирование применяется при параллельном использовании ВИЭ. Также ВИЭ применяется и при временном резервировании. К временному резервированию можно отнести создание запасов топлива, выше годовой необходимости. Схема резервирования для Крайнего Севера приведена ниже (Рисунок 7).



Рисунок 7 –Схема резервирования

4 Влияние ВИЭ на повышение надежности автономных энергетических систем Крайнего Севера

4.1 ВИЭ в составе автономных энергетических системах

Автономные энергетические системы, работающие только с помощью ветровой и солнечной энергии, не имеют возможности обеспечить непрерывное энергоснабжение в децентрализованных зонах. Для данных источников энергии характерна непостоянная выработка электроэнергии.

Работа ветровых энергетических установок (далее – ВЭУ) зависит от скорости ветра. Для определения ветроэнергетических ресурсов используют распределение Вейбулла, так как данное распределение показывает наибольшую точность в скоростном диапазоне от 4 м/с до 20 м/с [39].

Данные, полученные о скорости ветра, аппроксимируют функцией распределения [10]:

$$F(v) = 1 - e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}, \quad (4.1)$$

где c – параметр масштаба;

k – параметр формы;

$F(v)$ – функция интегральной повторяемости скорости ветра, которая показывает долю времени (вероятность) того, что скорость ветра равна или меньше v .

Плотность распределения:

$$f(v) = \frac{dF(v)}{dv} = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-\left(\frac{v}{c}\right)^k}. \quad (4.2)$$

Ожидаемая годовая выработка электроэнергии ВЭУ:

$$W_{\text{ВЭУ}}^{\text{ОЖ}} = T \cdot \sum_{i=1}^m p_i(v) \cdot N_i(v), \quad (4.3)$$

где T – число часов работы ВЭУ за год;

m – число градаций скоростей ветра;

$p_i(v)$ – периодичность скорости по градациям;

$N_i(v)$ – выходная мощность при данной скорости ветра, которая определяется при помощи рабочей характеристике ВЭУ.

Среднюю мощность ветроэнергетической установки можно определить по формуле [39]:

$$P_{\text{ср.ВЭУ}} = 4,81 \cdot 10^{-4} \cdot D^2 \cdot v_p^3 \cdot \xi \cdot \eta_p \cdot \eta_r, \quad (4.4)$$

где D – диаметр ветроколеса, м;

v_p – расчетная скорость ветра, м/с;

ξ – коэффициент использования ветрового потока;

η_p – КПД редуктора;

η_r – КПД генератора.

Режимы работы солнечных электростанций (далее - СЭС) определяются интенсивностью, поступающей на поверхность ФЭП солнечной радиации, которая постоянно меняется во времени.

Для прогнозирования работы СЭС (или ФЭП) используют данные среднесуточного удельного значения падающей солнечной радиации за месяц. В данном случае исключается необходимость в ежечасных данных о солнечном излучении. При прогнозировании используется база данных NASA, которая сформирована на данных, полученных со спутников [39].

Годовая ожидаемая выработка электроэнергии СЭС рассчитывается по формуле [40]:

$$W_{СЭС}^{ОЖ} = \sum_{i=1}^k E_i \cdot \eta_{ФЭП} \cdot \eta_{и} \cdot S_{ФЭП} \cdot n_{ФЭП} \cdot (T_{pdi} - T_{pbsi}), \quad (4.5)$$

где E_i – усредненное для i -го месяца суточное удельное значение падающей радиации на ориентировочную поверхность;

$\eta_{ФЭП}$ – КПД фотоэлектрического преобразователя;

$\eta_{и}$ – КПД инвертора;

$S_{ФЭП}$ – площадь незатененной части ФЭП;

$n_{ФЭП}$ – количество фотоэлектрических преобразователей;

T_{pdi} – количество дней в рассматриваемом i -м месяце;

T_{pbsi} – количество бессолнечных дней в i -м месяце.

Среднюю мощность СЭС за рассматриваемый период определим по формуле:

$$P_{ср.ФЭП} = E \cdot \eta_{ФЭП} \cdot \eta_{и} \cdot S_{ФЭП} \cdot n_{ФЭП} \cdot \frac{T_{pd} - T_{pbs}}{T_{pd}}. \quad (4.6)$$

Для поддержания непрерывного электроснабжения потребителей от АЭС на базе ВИЭ необходимо их совместное применение с ДЭС или с использованием АКБ. В перспективе возможно совместное использование различных типов ВИЭ.

4.2 Причины отказов оборудования автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ

Отказ в работе АЭС, основанных на ВИЭ, возможен даже при высоком уровне эксплуатации и хорошем качестве оборудования. Оборудование АЭС находится под влиянием разных факторов, которые влияют на надежную работу всего оборудования. Необходимо знать причины отказа оборудования для предотвращения или быстрого устранения в будущем, чтобы обеспечить высокий уровень надежности.

Причинами отказов ВЭУ могут быть повреждения конструкции любого компонента установки: разрушение основания, отказ лопастей, сдвиг болтов и т.д. Самым распространенным видом отказа оборудования ВЭУ является отказ электрической схемы, системы управления и датчиков [41].

Самым дорогостоящим видом отказа ветроэнергетических установок является повреждение лопастей, являющихся важным компонентом ВЭУ и имеющих высокую стоимость и длительность ремонта. Причины повреждений компонентов ветроэнергетических установок приведены в таблице 3 [10].

Таблица 3 – Повреждения ветроэнергетических установок

Узел ветроэнергетической установки	Причины повреждения
Лопасть ротора	Поверхностные повреждения, трещины, повреждения системы молниезащиты
Привод	Коррозия
Гондола	Коррозия
Гидравлическая и пневматическая система	Утечка, коррозия
Башня и фундамент	Коррозия, трещины
Предохранительные устройства, датчики и тормозные системы	Износ
Электрическая система, система управления	Коррозия, грязь

Доступ к статистическим данным об отказах ветроэнергетических установок не всегда возможен, так как большинство производителей предпочитают не раскрывать такие данные.

Причинами отказов ФЭП могут быть повреждения конструкции любого компонента установки: нарушение герметизации, разрушение верхнего стекла ФЭП и т.д. Виды отказов фотоэлектрических преобразователей и их причины появления приведены в таблице 4 [42].

Таблица 4 – Отказы фотоэлектрических преобразователей

Вид отказа ФЭП	Причины
Нарушение герметизации	Обесцвечивание, расслоение, попадание влаги
Разрушение верхнего стекла	Тепловые повреждения, ветер, град
Повреждения соединений и пайки	Электрические перегрузки, высокая температура нагрева ячеек
Растрескивание ячеек	Заводской брак, механические нагрузки (давление, вибрация), град, «человеческий фактор»
Диэлектрический пробой	Превышение допустимой температуры
Отслаивание (расслоение) составных элементов модуля	Расширение изгибающих напряжений из-за неравномерного расширения и сжатия захваченной влаги и воздуха и т.д.

Причинами отказов АКБ являются: коробление электродов, короткое замыкание, вредные примеси в электролите, переплюсовка элементов и т.д. Виды отказов аккумуляторных батарей и их причины появления приведены в таблице 5 [43].

Таблица 5 – Отказы АКБ и причины их появления

Вид отказа АКБ	Причины
Сульфатация электродов	Недостаточность первого заряда
	Систематические недозаряды
	Продолжительное время оставления батареи разряженной
Короткое замыкание	Неполное покрытие электродов электролитом
Коробление положительных электродов	Коробление положительных электродов
	Превышение значения зарядного тока при приведении в действие батареи
Коробление отрицательных электродов	Короткое замыкание данного электрода с соседним отрицательным
	Повторные перемены направления заряда при изменении полярности электрода
Усадка отрицательных электродов	Воздействие со стороны соседнего положительного электрода
	Высокое значение зарядного тока
Изменение размеров положительных электродов	Разряды до конечных напряжений ниже допустимых значений
	Загрязнение электролита
Разъедание нижней части положительных электродов	Систематическое недоведение заряда до конца, в результате чего после доливок электролит плохо перемешивается и происходит его расслоение

Отказы АКБ и их причины выявляются в результате проводимых испытаний, измерений и внешних осмотров.

4.3 Задачи анализа надежности автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ

В ходе анализа надежности АЭС, основанных на ВИЭ решаются следующие задачи:

- Моделирование и оценка надежности АЭС, использующих ВИЭ;
- Оценка надежности малых изолированных энергосистем (МИЭС);
- Разработка и применение моделей оценки затрат/стоимости надежности для АЭС, использующих ВИЭ.

У анализа надежности АЭС, основанных на ВИЭ, есть множество особенностей, которые представлены в работах [44, 45]. Основной задачей работы [45] было расширение концепции работоспособности для оценки надежности АЭС, работающих параллельно с АКБ.

4.4 Работоспособность автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ

При оценке работоспособности многие энергетические компании используют детерминированный критерий, который также используется при проектировании небольших автономных энергетических систем [46].

Работоспособность системы, обозначенная принятыми детерминированными критериями, определяется как исправная, предельная и с риском. Используемые обозначения представлены на рисунке 8. Система работоспособна только тогда, когда она имеет достаточный резерв или аккумулирующую способность, которая соответствует детерминированному критерию.

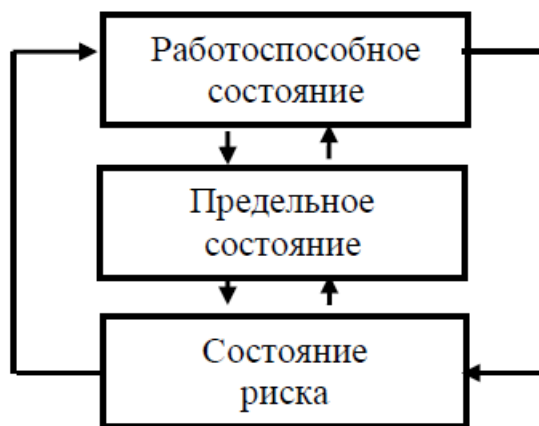


Рисунок 8 – Критерии работоспособности системы

Система в предельном состоянии имеет недостаточный резерв или аккумулирующую емкость, чтобы выдержать данный детерминированный критерий. Система находится в состоянии риска, если нагрузка выше возможностей генерации и аккумуляции. Оценка надежности, основанная на критериях работоспособности системы, упрощает интерпретацию показателей риска и обеспечивает необходимой информацией проектировщиков автономных энергетических систем.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения магистерской диссертации на тему «Разработка предложений по повышению надежности автономных энергетических систем» был проведен анализ состояния и причины отказов автономных энергетических систем. Результаты анализа представлены в Таблице 1, таблице 3, таблице 4, таблице 5.

В результате проведенного анализа аварийности были выявлены:

- причины аварийности автономных энергетических систем, результаты которого представлены в пункте 2.3;
- рассмотрена аварийность энергоснабжения Крайнего Севера и приведена её классификация (глава 3.2).

Также были рассмотрены и изучены методы оценки надежности автономных энергетических систем.

По результатам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что:

- Большая часть ДЭС на территории России нуждается в замене или модернизации, с внедрением ВИЭ. Это позволит сократить затраты на топливо и его транспортировку, а также повысит надежность энергоснабжения потребителей в зонах децентрализованного энергоснабжения;
- Внедрение автономных энергетических систем, основанных на ВИЭ, возможно, но не везде. Данные установки не способны обеспечить непрерывное энергоснабжение. Также данные установки необходимы в дальнейшей модернизации, чтобы уменьшить число отказов оборудования;
- Помимо надежности оборудования автономных энергетических систем, также необходимо уделить внимание минимизации влияния «человеческого фактора» путем найма и обучения квалифицированного персонала.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. ГОСТ Р 57114-2016. Единая энергетическая система и изолированно работающие энергосистемы. Оперативно-диспетчерское управление в электроэнергетике и оперативно-технологическое управление. [Электронный ресурс] // . - Режим доступа: - <http://docs.cntd.ru/document/1200139922>
2. История ГОЭРЛО. Официальный сайт Министерства Энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс] // . - Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/node/3039>
3. Энергетическая стратегия России до 2035 года. Основные положения. Минэнерго России. Официальный сайт Министерства Энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс] // . - Режим доступа: <http://minenergo.gov.ru/>
4. Доктрина энергетической безопасности Российской Федерации. Официальный сайт Министерства Энергетики Российской Федерации. [Электронный ресурс] // . - Режим доступа: <https://minenergo.gov.ru/view-pdf/14766/96941>
5. Елистратов, В. В. Автономное энергоснабжение территорий России энергокомплексами на базе возобновляемых источников энергии / В. В. Елистратов // Энергетический вестник. – 2016. – № 21. – С. 42-49.
6. Судаков П.А. Оценка надежности автономных энергетических систем / П.А. Судаков // Гидроэлектростанции в XXI веке: Сборник материалов VII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов, Саяно-Шушенский филиал СФУ, Саяногорск; Черемушки, 2020 г – С. 379-383.
7. Судаков П.А. Разработка предложений по повышению надежности автономных энергетических систем / П.А. Судаков, М.Ф. Носков // Гидроэлектростанции в XXI веке: Сборник материалов VI Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, специалистов, аспирантов и студентов, Саяно-Шушенский филиал СФУ, Саяногорск; Черемушки, 2019 г – С. 94-98.

8. Суфлян, Д.А. Проблемы надежности автономных систем электроснабжения децентрализованной энергозоны / Д.А. Суфляр, В.Р. Киушкина // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике: Материалы X Всероссийской научно-технической интернет-конференции, Том 1, Пермский нац. иссл. политех. ун-т, Пермь, 2016. – С. 46-52.

9. Суржикова, О. А. Проблемы и основные направления развития электроснабжения удаленных и малонаселенных потребителей России // Вестник науки Сибири. – 2012. – №3 (4). – С. 103-108.

10. Кривенко, Т.В. «Развитие моделей и методов оценки надежности автономных систем генерации, использующих возобновляемые источники энергии»: магистерская диссертация: 05.04.02 / Кривенко Татьяна Васильевна. — Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2018.

11. Соснина, Е.Н. Вопросы электроснабжения потребителей, удаленных от сетевой инфраструктуры / Е.Н. Соснина, А.Ю. Кечкин, Д.А. Филатов // Труды Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева. – 2014. – № 5(107). – С. 100-105.

12. Суходолов, А.П. Дизельные электростанции Иркутской области и проблемы электроснабжения удаленных населенных пунктов / А.П. Суходолов, В.Ф. Федоров, Д.Ю. Хорохонов // Известия Иркутской государственной экономической академии. – 2004. – № 3.

13. Системный оператор Единой энергетической системы: [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://so-ups.ru/>.

14. Stember L. H. Reliability considerations in the design of solar photovoltaic power systems // Solar Cells. – 1981. –Vol. 3, No. 3. – P. 269–285.

15. Stember L. H., Huss W. R., Bridgman M. S. A methodology for photovoltaic system reliability and economic analysis // IEEE Transactions on reliability. – 1982. – Vol. 31, No 3. – P. 296–303.

16. Zhang P., Wang Y., Xiao W., Li W. Reliability evaluation of grid-connected photovoltaic power systems // IEEE Trans Sust Energy. – 2012. – Vol. 3, No 3. – P. 379-389.

17. Wang Y., Zhang P., Li W. Comparative analysis of the reliability of grid-connected photovoltaic power systems. IEEE PES general meeting; San Diego; 2012.

18. Прохоров, Д.В. «Повышение надежности децентрализованных энергетических систем северных территорий»: магистерская диссертация: 05.14.01 / Прохоров Дмитрий Валерьевич. — Якутск: Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова Сибирского отделения Российской академии наук, 2018.

19. Перечень районов Крайнего Севера и приравненных к ним местностей. Официальный сайт Федеральной службы государственной статистики [Электронный ресурс] // - Режим доступа: https://www.gks.ru/bgd/regl/b09_22/isswww.exe/stg/territoriya.htm

20. Безопасность Республики Саха (Якутия): социальные, экономические и техногенные проблемы / под ред. В.Ю. Фридовского, В.А. Прохорова. Новосибирск: Наука, 2008. 296 с.

21. Прохоров В.А., Иванов В.Н., Попова М.В. Проблема обеспечения безопасности системы теплоснабжения населенных пунктов Якутии / Безопасность труда в промышленности, 2009. №12. – С. 49-52.

22. Попырин Л.С. Безопасность объектов теплоэнергетики / Теплоэнергетика, 1995, №9. - С .20-26.

23. Беляев Ю.К., Богатырев В.А., Болтин В.В. и др. Надежность технических систем: справочник / под ред. И.А. Ушакова. М.: Радио и связь, 1985. 608 с.

24. Дружинин Г.В. О количественных показателях безопасности функционирования технологических систем // Надежность и контроль качества. – 1993. - №5. – С. 3-13.

25. Надежность и эффективность в технике: справочник. Т.1. –М.: Машиностроение, 1986. – 223 с.
26. Васин В.П., Скопинцев В.А. Проблемы промышленной безопасности объектов энергетики // Известия Академии наук. Энергетика, 1994, №5. С.3-17.
27. Лесных В.В. Анализ риска и механизмов возмещения ущерба от аварий на объектах энергетики. – Новосибирск: Наука, 1999. – 251 с.
28. Постановление Правительства РФ от 21.05.2007 г. №304 «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» (с изменениями и дополнениями). [Электронный ресурс] //. - Режим доступа: <https://base.garant.ru/12153609/>
29. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. -560 с.
30. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.
31. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. - М.: Наука, 1989. 328 с.
32. Хенли Э., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
33. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. - М.: Наука, 1979. -415 с.
34. Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы / Г.Ф. Ковалев, Е.В. Сеннова, М.Б. Чельцов и др./ Под ред. Н.И. Воропая. – Новосибирск: Наука. Сибирское предприятие РАН, 1999. – 434 с.
35. Надежность систем энергетики. Терминология / Под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Наука, 1980. – вып. 95. – 43 с.
36. Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука, 1974. – 263 с.
37. Волков Г.А. Оптимизация надежности электроэнергетических систем. М.: Наука, 1986. 117 с.

38. Иткин Е.А., Борисовский М.А., Шадрин В.А. Исследование экономических показателей надежности потребителей в объединенных энергосистемах / Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Показатели надежности систем энергетики и область их применения. Иркутск, 1979. – вып. 11 – С. 35-43

39. Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России / П. П. Безруких, Ю. Д. Арбузов, Г. А. Борисов, В. И. Виссарионов и др. – СПб.: Наука, 2002. – 314 с.

40. Иванов, Г. А. Особенности эксплуатации солнечной автономной гибридной энергоустановки в условиях Северо-Западного федерального округа / Г. А. Иванов, А. В. Бобыль, Е.М. Ершенко, Е.И. Теруков // Журнал технической физики. – 2014. - №10(84). – С. 63-67.

41. Ciang C. C., Lee J., Bang H. Structural health monitoring for a wind turbine system: a review of damage detection methods // Measurement science and technology. – 2008. – Vol. 19, No. 12. – P. 1-20.

42. Cristaldi L., Faifer M., Lazzaron M., Khalil M. A. F., Catelani M., Ciani L. Failure modes analysis and diagnostic architecture for photovoltaic plants // 13th IME-KO TC10 Workshop on technical diagnostics advanced measurement tools in technical diagnostics for systems reliability and safety, 2014. – P. 206-211.

43. Кочуров, А.А. Теоретические основы решения проблемы увеличения сроков службы аккумуляторных батарей при хранении и повышении эффективности способов их восстановления: монография / А.А. Кочуров, В.Ю. Гумелев, Н.П.Шевченко; под общ. ред. А.А. Кочурова. – Рязань: Ряз. высш. возд.-дес. ком. уч-ще, 2012. – 252 с.

44. Bagen. Generating capacity adequacy evaluation of small stand-alone wind and solar energy based power systems using a sequential simulation technique, Master's Thesis, University of Saskatchewan, 2002.

45. Bagen. Reliability and Cost/Worth Evaluation of Generating Systems Utilizing Wind and Solar Energy PhD. thesis, University of Saskatchewan, 2005.


46. Newfoundland & Labrador Hydro, «Solated systems generating planning practices: A survey of Canadian Utilities», Nov. 1995.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
САЯНО-ШУШЕНСКИЙ ФИЛИАЛ

Кафедра «Гидроэнергетики, гидроэлектростанций, электроэнергетических
систем и электрических сетей»

УТВЕРЖДАЮ

И.о. заведующего кафедрой


подпись А.А. Ачитаев
инициалы, фамилия
« 04 » 07 2020 г.

МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ ПО ПОВЫШЕНИЮ НАДЕЖНОСТИ
АВТОНОМНЫХ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

13.04.02 Электроэнергетика и электротехника

13.04.02.06 Гидроэлектростанции

Научный руководитель	 подпись, дата	профессор кафедры ГГЭЭС доктор технических наук должность, ученая степень	<u>М.Ф. Носков</u> инициалы, фамилия
Выпускник	 подпись, дата		<u>П.А. Судаков</u> инициалы, фамилия
Рецензент	 подпись, дата	Зам. начальника ПТО Филиала ПАО «Якутскэнерго» - Каскад Виллойских ГЭС им. Е.Н. Батенчука должность, ученая степень	<u>И.К. Кабаненко</u> инициалы, фамилия
Нормоконтролер	 подпись, дата		<u>А.А. Чабанова</u> инициалы, фамилия

Саяногорск; Черемушки 2020