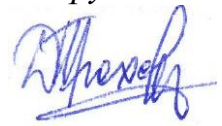


На правах рукописи



Прохоров Дмитрий Валерьевич

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт физико-технических проблем Севера им. В. П. Ларионова» Сибирского отделения Российской академии наук

Научный руководитель доктор технических наук, профессор
Петров Николай Александрович

Официальные оппоненты: **Ковалев Геннадий Федорович**, доктор технических наук, профессор, Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт систем энергетики им. Л.А. Мелентьева» Сибирского отделения Российской академии наук, отдел энергетической безопасности №30, ведущий научный сотрудник
Дектерев Александр Анатольевич, кандидат технических наук, старший научный сотрудник, Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт теплофизики им. С. С. Кутателадзе» Сибирского отделения Российской академии наук, лаборатория физических основ энергетических технологий, старший научный сотрудник

Ведущая организация Красноярский филиал Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук – Специальное конструкторско-технологическое бюро «Наука».

Защита диссертации состоится «10» октября 2018 г. в 16 часов 00 минут на заседании диссертационного совета Д 212.099.07, созданного на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660049, г. Красноярск, ул. Ленина, д.70, ауд. 204.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета <http://www.sfu-kras.ru>

Автореферат разослан «___» _____ 2018 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



Сизганова Евгения Юрьевна

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы обусловлена необходимостью повышения эффективности функционирования децентрализованных энергетических систем (ЭС) и комплексов и обеспечения устойчивого энергоснабжения населенных пунктов Крайнего Севера с минимизацией их опасного воздействия на окружающую среду при возникновении аварийных ситуаций (АС) природного и техногенного характера с учетом возможных ущербов.

Специфика природно-климатических условий Крайнего Севера выдвигает особые требования для комплексного решения проблемы безопасности жизнедеятельности при возникновении аварий в системе энергоснабжения (СЭ), которые сопровождаются значительным экономическим ущербом. Обеспечение эффективности, надежности и безопасности СЭ децентрализованных потребителей является острой нерешенной проблемой в циркумполярных регионах. Решение этой проблемы напрямую зависит от применяемой методологии оценки надежности объектов энергетики и является основой устойчивого функционирования производственного потенциала арктических территорий страны.

Степень разработанности. Исследованию свойств ЭС посвящены работы Л.С. Беляева, Н.И. Воропая, Л.А. Мелентьева, Ю.Н. Руденко, И.А. Ушакова, Б.Г. Санеева, С.М. Сендерова, В.Г. Китушина, А.Л. Мызина, Б.В. Папкина, Л.С. Попырина, Е.В. Сенновой, В.А. Стенникова и др. Однако, используемые в настоящее время методы оценки надежности отдельных элементов и системы в целом не позволяют в полной мере оценить их безопасность и обосновать эффективные мероприятия по их совершенствованию, недостаточно разработаны количественные показатели безопасности функционирования ЭС. Данные об отказах СЭ в условиях Севера представляют собой многокомпонентную информацию, которые могут быть интерпретированы как результат натурального эксперимента, и использоваться в качестве основы для решения проблемы эксплуатационной надежности и безопасности технических систем.

Работа выполнена в рамках научного проекта IX.88.2.4 «Разработка методологии и системы моделей для прогнозирования и исследования долгосрочного развития ТЭК региона Севера в условиях реализации экспортноориентированных мегаэнергопроектов» на примере Республики Саха (Якутия) по программе фундаментальных исследований СО РАН IX.88.2 «Тенденции и закономерности стратегического развития энергетики Азиатской России в первой половине XXI века с учетом энергетической кооперации со странами Северо-Восточной Азии».

Объект исследования – децентрализованные энергетические системы северных населенных пунктов и муниципальных образований.

Предмет исследования – характеристики надежности и безопасности децентрализованных энергетических систем.

Цель работы состоит в повышении надежности децентрализованных систем энергоснабжения северных территорий.

Основная идея диссертации заключается в использовании результатов анализа статистических данных и рисков возникновения аварийных ситуаций с

целью совершенствования энергетических систем и комплексов циркумполярных регионов на примере децентрализованных систем энергоснабжения Республики Саха (Якутия).

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

1. Выбор и обоснование показателей эффективности функционирования энергетических систем и комплексов северных территорий;
2. Разработка методики расчета вероятности неблагоприятных событий децентрализованной ЭС;
3. Выбор показателей тяжести отказов на основе статистического анализа аварий ЭС в условиях Крайнего Севера;
4. Оценка ущербов при отказах децентрализованных ЭС;
5. Развитие методов оценки надежности и безопасности децентрализованных систем энергоснабжения.

Методология и методы исследования. Для решения поставленных задач использованы методы: системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории надежности, экономико-математического анализа. Собранные и обобщены в безразмерном виде и проанализированы известные результаты исследований различных авторов и статистические данные по региону.

Научная новизна и основные результаты, выносимые на защиту:

1. Предложена в общем виде усовершенствованная методика расчета вероятности неблагоприятных событий в децентрализованных неоднородных ЭС;
2. Обоснованы основные показатели эффективности функционирования децентрализованных СЭ в условиях Крайнего Севера: время восстановления, температурный режим помещений, ущерб, число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности и число пострадавших-эвакуированных людей. Установлены критериальные значения таких показателей, как время восстановления и температурный режим помещений;
3. На основе анализа ущербов предложена классификация АС СЭ по совокупности частных показателей тяжести последствий отказов, позволяющая устанавливать класс АС и величины возможных ущербов для децентрализованных ЭС и комплексов.

Значение для теории. Предложенные модели и методы определения показателей надежности и риска аварийных событий в ЭС создают научную основу повышения безопасности теплоснабжения в условиях Крайнего Севера.

Практическая значимость результатов работы состоит в том, что полученные результаты позволяют более обоснованно и корректно решать задачи проектирования децентрализованных систем теплоснабжения в циркумполярных регионах с учетом макроэкономических характеристик ущерба, выбирать возможные схемы резервирования и проводить варианты ситуационные решения по мероприятиям повышения безопасности системы.

Результаты работы использовались при выполнении ИФТПС СО РАН проектов № III.15.1.5. «Разработка научно-методологического сопровождения реализации Энергетической стратегии региона Севера с учетом неопределенно-

сти будущих условий при осуществлении масштабных проектов топливно-энергетического комплекса и магистральных линий электропередачи развития ЕНЭС на Востоке России» в рамках приоритетного направления исследований СО РАН Ш.15 «Основы развития и функционирования энергетических систем в рыночных условиях, включая проблемы энергоэффективности экономики и глобализации энергетики; энергобезопасность; энергоресурсосбережение и комплексное использование природных топлив» (2010-2012 гг.).

Достоверность полученных результатов обеспечена представительным объемом базы данных, корректным применением апробированных методик расчета показателей надежности и безопасности сложных технических систем. Выводы достаточно хорошо коррелируют с результатами, полученными другими исследователями, и не противоречат физическим закономерностям в смежных областях знаний.

Апробация работы. Основные положения работы и ее отдельные результаты докладывались и обсуждались на Всероссийской научно-практической конференции «ЭРЭЛ-2012» (Якутск), XIV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Нерюнгри - 2013), VI Евразийском симпозиуме по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2013 (Якутск), 86-м заседании Международного научного семинара им. Ю.Н. Руденко «Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики» (Санкт-Петербург - 2014), всероссийской научной конференции XVIII Лаврентьевские чтения (Якутск - 2014), VII Евразийском симпозиуме по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2014 (Санкт-Петербург), III Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы строительства и жизнеобеспечения: безопасность, качество, энерго- и ресурсосбережение» (Якутск - 2014), XVII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов (Нерюнгри - 2016), VIII Евразийском симпозиуме по проблемам надежности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD–2018 (Якутск).

По теме диссертации опубликовано 11 печатных работ, из них: 5 статей в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК; 1 статья в издании, входящем в международную базу данных Scopus; 1 статья в сборнике научных трудов; 4 статьи в материалах конференций различного уровня.

Структура и объем диссертации. Материалы диссертации изложены на 123 страницах основного текста, включающего 19 рисунков и 11 таблиц. Работа состоит из введения, четырех разделов, основных выводов и рекомендаций, списка использованной литературы из 120 наименований и одного приложения.

Личный вклад автора состоит в постановке цели и задач исследования, разработке, обосновании и формулировке всех положений, определяющих научную новизну и практическую значимость, анализе и обобщении результатов, формулировке выводов и рекомендаций для принятия решений. Развитие основной научной идеи и общие направления решения задач выполнены при участии

научного руководителя. В совместных публикациях вклад автора составляет от 50 до 75 %.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, обоснована актуальность выбранной темы, поставлена цель и определены задачи исследования. Сформулированы основные положения, выносимые на защиту, научная новизна и практическая значимость полученных результатов.

Результаты анализа обзора литературных источников подтверждают актуальность работы и целесообразность постановки решаемых в диссертации задач.

В первой главе представляется природно-климатическая и социально-экономическая характеристика региона, особенности и состояние энергоснабжения северных территорий, проведен анализ аварийности в ЭС.

Для анализа АС в ЭС Республики Саха (Якутия) (РС(Я)) были использованы материалы аварий по данным МЧС РС(Я). Рассмотрено более 280 аварий, произошедших в течение 10 лет на объектах энергетики РС(Я). Отказы, разрушения, АС являются следствием сочетания и проявления многих факторов. Климатические условия являются одной из основных причин отказов элементов системы. Интенсивность аварий повышается при низких температурах (рис. 1). Все подсистемы энергоснабжения эксплуатируются в суровых климатических условиях, их отказы вызывают значительные экономические потери особенно на объектах социальной сферы (табл. 1). Величина прямого ущерба только на объектах социальной сферы на протяжении последнего десятилетия составляла ежегодно 6 - 8 млн руб.

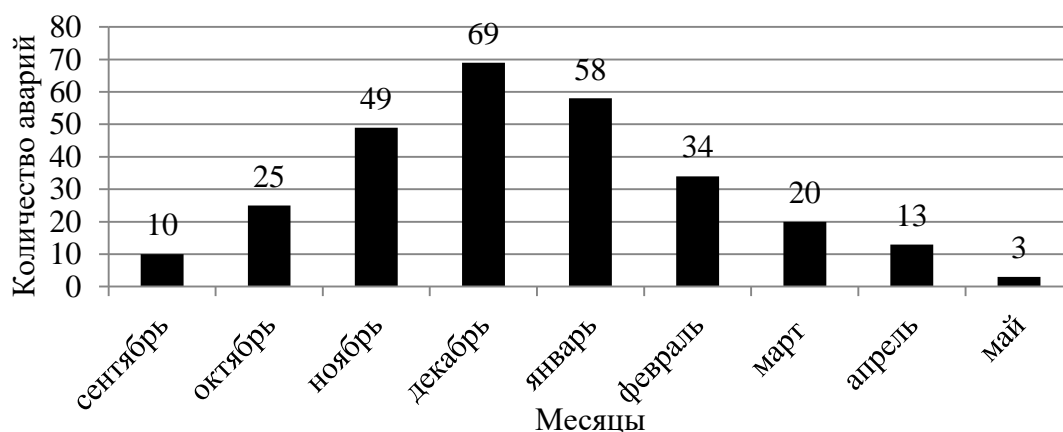


Рис. 1. Распределение аварий на объектах энергоснабжения по месяцам.

Таблица 1. Ущерб при авариях

Дата и место аварии	Ущерб, тыс. руб.	Социальный ущерб (аварийные объекты)
10.02.02 г. г. Среднеколымск	17,7	Жилой фонд, детский сад
04.03.02 г. с. Кемпендяй	46,8	Детский сад на 50 мест, здание АТС, администрация села
28.11.02г. п. Солнечный	3362,6	89 жилых домов, детский сад, школа
7.12.02 г. с. Кэрдэм	1556,4	Клуб, детский сад, спортзал, интернат, гараж

28.12.02 г. с. Саскылах	1120,9	47 частных домов, 13 муниципальных домов, 2 школы, детсад
-------------------------	--------	---

Во второй главе представлены результаты системного анализа объекта исследования, определены его основные свойства и показатели, установлены и предложены критериальные значения показателей тяжести последствий отказов при эксплуатации СЭ. СЭ на Крайнем Севере состоит из систем электроснабжения и теплоснабжения. Основными элементами системы электроснабжения являются системы топливоснабжения, генерации электроэнергии и транспортировки электроэнергии. Система теплоснабжения включает системы водоснабжения, топливоснабжения, выработки тепла и транспортировки тепла.

Одной из главных причин выхода из строя децентрализованных СЭ являются отказы различных функциональных подсистем. Данные об авариях по системным элементам (подсистемы) представлены на рис. 2. Аварийные ситуации, как правило, развиваются по каскадным сценариям, приводящим к массовому нарушению подачи энергии потребителям, и в совокупности повышают уровень ущербов от АС (табл. 2). В том случае, когда не удастся своевременно реагировать на нарушение работы элементов системы, ввести резервы, авария принимает глобальный характер, распространяется на другие подсистемы. Как видно из таблицы, наиболее слабым звеном СЭ является система теплоснабжения и тепловые сети. Сценарный анализ АС показывает, что высокие ущербы имеют место при полном замораживании теплопроводов при низких температурах вследствие пониженной живучести этой системы.

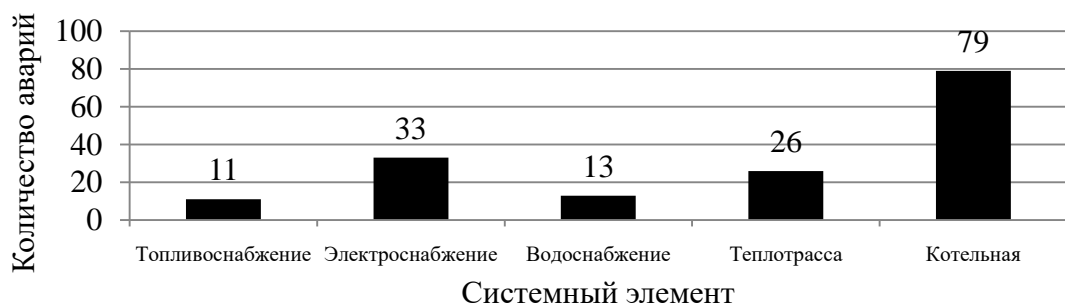


Рис. 2. Распределение аварий по системным элементам

Таблица 2. Каскадное развитие аварий

	Всего аварий	Топливоснабжение	Электроснабжение	Водоснабжение	Котельная	Тепловые сети	Количество каскадных аварий
Водоснабжение	13			13		3	3
Электроснабжение	33		33	7		6	13
Топливо-снабжение	11	11	3			4	7
Котельная	79				79	19	19
Тепловые сети	26					26	-

Каскадное развитие аварий усугубляет аварийность ЭС с переходом других подсистем в аварийное состояние (до 40% от общего числа аварий). В нормативных документах регламентируется надежность СЭ (табл. 3). Показатели надежности СЭ и их критериальные значения приведены в ГОСТ-ах и отраслевых документах. Для СЭ в условиях Севера обеспечение надежности отдельных элементов системы не позволяет сохранить безопасность системы в целом. При одинаковой надежности систем в условиях Севера ущерб может быть на несколько порядков выше, чем для таких же систем центральных регионов. Применительно к СЭ Севера, свойство надежности, согласно определения, оказывается необходимым, но не достаточным, т.к. не может обеспечить и всецело характеризовать качество функционирования данной системы. Следовательно, определяющим свойством исследуемой системы целесообразно рассматривать более общее свойство – безопасность СЭ, характеризующей качество системы на стадии эксплуатации. Из анализа применяемых определений свойств объектов можно заключить, что свойство надежности на стадии функционирования СЭ соответствует определению безопасности по ГОСТ. Отличие предлагаемого подхода заключается в выборе показателя, характеризующего состояние объекта. Интегральным показателем, отражающим уровень безопасности СЭ, принимается риск как прогнозируемый ущерб (табл. 3). В этом случае безопасность связывается со свойством эффективности системы.

Таблица 3. Характеристика показателей и критерии функционирования СЭ

Свойство СЭ	Характеристика показателя и критерии
Безопасность СЭ	Вероятностный ущерб как произведение величины события на меру возможности его наступления: $R = Q_f \cdot Y,$ где Q_f – вероятность отказа, Y – ущерб
Надежность функционирования СЭ	Вероятность безотказной работы ($P > 0.86$) СП 124.13330.2012

Проведена классификация отказов и анализ аварий СЭ в условиях Севера. На основе проведенного анализа в качестве показателей, определяющих тяжесть последствий при авариях СЭ, приняты: число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности, число пострадавших людей (эвакуированных), время отключения энергоснабжения, температура в зданиях при ограничении и остановке подачи тепла, материальная часть ущерба от стоимости материальных ценностей и восстановительной части. Количество потерпевших людей (эвакуированных) и число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности характеризуют социальную часть ущерба, время отключения энергоснабжения, температура в зданиях при ограничении и остановке подачи тепла – социально-экономическую, а ущерб – экономическую составляющую.

Функциональный сценарий развития отказа включает следующие этапы: отказ оборудования в системе теплоснабжения – ограничение тепловой энергии потребителям вплоть до полного прекращения ее подачи – падение температуры воздуха в жилых помещениях. Снижение поставки тепла или его прекращение

напрямую отражается на качестве жизни населения. Аварийные ситуации, связанные с нарушением энергоснабжения зданий, представляют потенциальную опасность недопустимого снижения качества теплоснабжения в помещениях. По характеру теплового режима в зданиях при отказе в системе теплоснабжения проведено разделение всего массива отказов (за 2011-2013 гг.) на три группы: теплоснабжение не нарушено, частичное нарушение теплоснабжения и полное отключение теплоснабжения (рис. 3). Анализ массива отказов показывает, что большая часть событий относится к частичному нарушению теплоснабжения: около 90% от всех аварийных отказов.

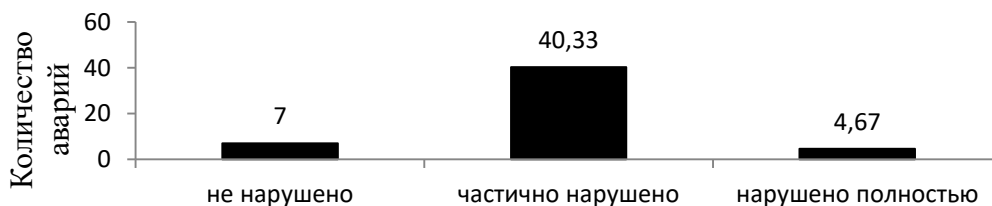


Рис. 3. Состояния теплового режима при отказе системы теплоснабжения

Температура в здании характеризует состояние работоспособности СЭ и является одним из основных показателей тяжести отказа. Снижение поставки тепла или его прекращение приводит к падению температуры воздуха в отапливаемых жилых помещениях ниже нормируемого значения, равного 18-22 °С. Изучение механизма терморегуляции показывает, что границей гипотермической опасности для человека является температура воздуха в помещении равная 12 °С. Принимаются два уровня граничной температуры: $t_{к1}$ – нормальная для жизнедеятельности температура, равная 20°С и $t_{к2}$ – критическая для жизнедеятельности температура, равная 12 °С, ниже которой пребывание человека в здании не допустимо согласно свода правил.

Среди множества показателей надежности технических систем наиболее важным для СЭ является среднее время её восстановления. По данным отказов в СЭ построены гистограммы времени восстановления при отказах системы теплоснабжения, системы электроснабжения и системы водоснабжения за 2011-2013 гг. (рис. 4-6). Анализируя состояния системы теплоснабжения при их отказах по различным интервалам времени восстановления, построено распределение отказов для граничных значений времени: 6 часов, 24 часа и 72 часа, что более соответствует состояниям теплового режима при отказе системы теплоснабжения (рис. 3). Из статистики аварий следует, что наибольшее число отказов происходит из-за нарушений в системе электроснабжения. Однако их большая часть (около 90 %) восстанавливается в течение суток. Если в системе теплоснабжения и электроснабжения количество отказов по времени восстановления интенсивно снижается, то для отказов в системе водоснабжения отказы распределяются более равномерно по времени. Для первых двух систем в первые три часа восстанавливается до 30% от всех отказов. Для системы электроснабжения за 6 часов восстанавливается половина всех отказавших систем. За сутки восстанавливается 80-90% от всех отказов. В системе теплоснабжения за 6 часов восстанавливается примерно 50% отказавших систем, за сутки – 75%. В общем потоке

отказов события «тепловой режим не нарушается» или «имеет место частичное снижение температуры в зданиях» в сумме занимают 90% от всех отказов. Событие «нарушено полностью» соответствует примерно времени восстановления системы теплоснабжения около трех суток. Время восстановления более трех суток приходится на 5-10% отказов, которые сопровождаются полной потерей работоспособности всей системы, и вызывают в основном продолжительные прекращения подачи энергии. При отказах восстановление теплового режима, как показывает анализ аварий, может продолжаться до 6-ти часов, что будет соответствовать событию «тепловой режим не нарушается». Событие «частичное потеря теплового режима» по своей тяжести разделяется на два уровня по температурному режиму здания – от 6-ти часов до 24-х часов и от 24-х до трех суток.

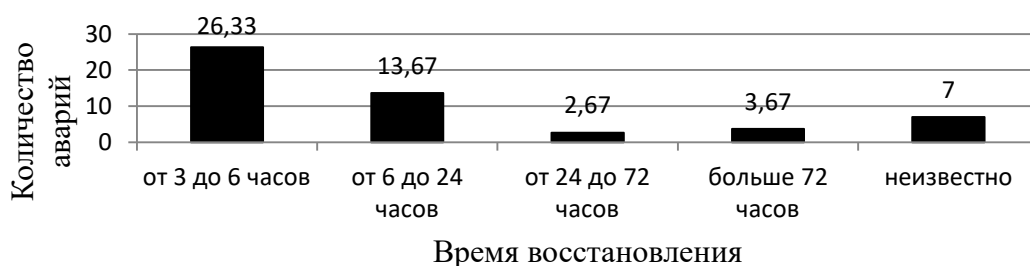


Рис. 4. Время восстановления при отказе системы теплоснабжения

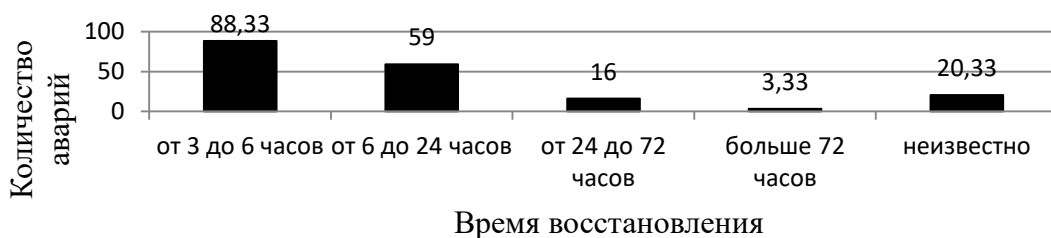


Рис. 5. Время восстановления при отказе системы электроснабжения

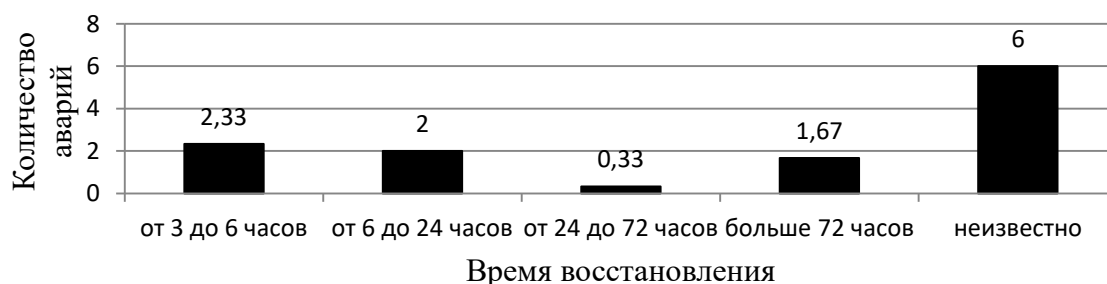


Рис. 6. Время восстановления при отказе системы водоснабжения

Система теплоснабжения считается исполняющей свою основную функцию, если здоровью людей не наносится ущерб из-за нарушения снабжения потребителей теплом. Следовательно, показателями качества функционирования ЭС является число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности, связанное со снижением качества поставки тепла, и число пострадавших людей при полном прекращении подачи тела, определяемое количеством эвакуированных

людей. Подводя итоги анализа, за основные показатели качества функционирования СЭ в условиях Севера следует принять время восстановления, температурный режим помещений, ущерб, число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности и число пострадавших людей (эвакуированных).

В третьей главе рассмотрены вопросы определения показателей надежности децентрализованной СЭ Крайнего Севера. Как установлено из анализа аварийности, выход из строя оборудования происходит по многим причинам. Причины отказов функциональных систем приведены в табл. 4. Например, как показывают примеры аварий, отказ котла может произойти из-за выхода из строя датчика контроля пламени. Неисправность системы водоснабжения может произойти из-за утечки воды в теплотрассе, ограниченного количества воды в глубоинной скважине, понижения уровня рек и промерзания водовода. Климатические явления являются одной из причин отказа элементов системы. Под действием сильного ветра могут рушиться опоры электролиний, происходить обрыв линий электропередачи или короткие замыкание.

На основе анализа сценариев аварий составлена структурная схема развития АС в СЭ в условиях Севера (рис. 7). Составленная причинно-следственная схема развития аварий представляет собой разветвленную структуру. Имеется семь уровней по вертикали, при этом события нижнего уровня не могут влиять на события более высокого уровня расположения.

Таблица 4. Причины аварий по функциональным системам

Отказ	Причины
Оборудование котельной	Выход из строя датчика контроля пламени, течь в котле, разрыв водяной камеры, выход из строя форсунок, хлопок в топке и др.
Система электро-снабжения	Короткое замыкание, отказ трансформатора, обрыв кабеля, падение опор ЛЭП, повреждение опорного изолятора и др.
Система водоснабжения	Утечка воды в теплотрассе, ограничение воды в глубоинной скважине, понижение уровня воды рек, замерзание водовода и др.
Система топливо-снабжения	Нехватка топлива, некачественное топливо, поломка транспортной ленты углеподачи.
Система транспортировки тепла	Отказ насоса, отказ систем водоснабжения, теплоснабжения, электро-снабжения, топливоснабжения.

В самой верхней части находятся события, зависящие от климатических особенностей (низкая температура, сильный ветер) и от особенностей социальной среды (человеческий фактор, состояние управления). Они могут явиться причиной отказа технического оборудования и объектов. Снижение подачи электроэнергии потребителям или отказ этой системы может произойти при появлении хотя бы одной из причин, таких как отказ системы генерации электричества и отказ системы транспортировки электроэнергии. В свою очередь эти два события зависят от системы независимых причин. Например, события «обрыв линии», «короткое замыкание», «отказ трансформатора» не зависят друг от друга,

при допущении что события «обрыв линии», «короткое замыкание» представляют отдельные физические явления. Событие «отказ системы генерации электричества» также является следствием реализации хотя бы одной из трех событий-причин. Остановка системы подачи тепла возможна как

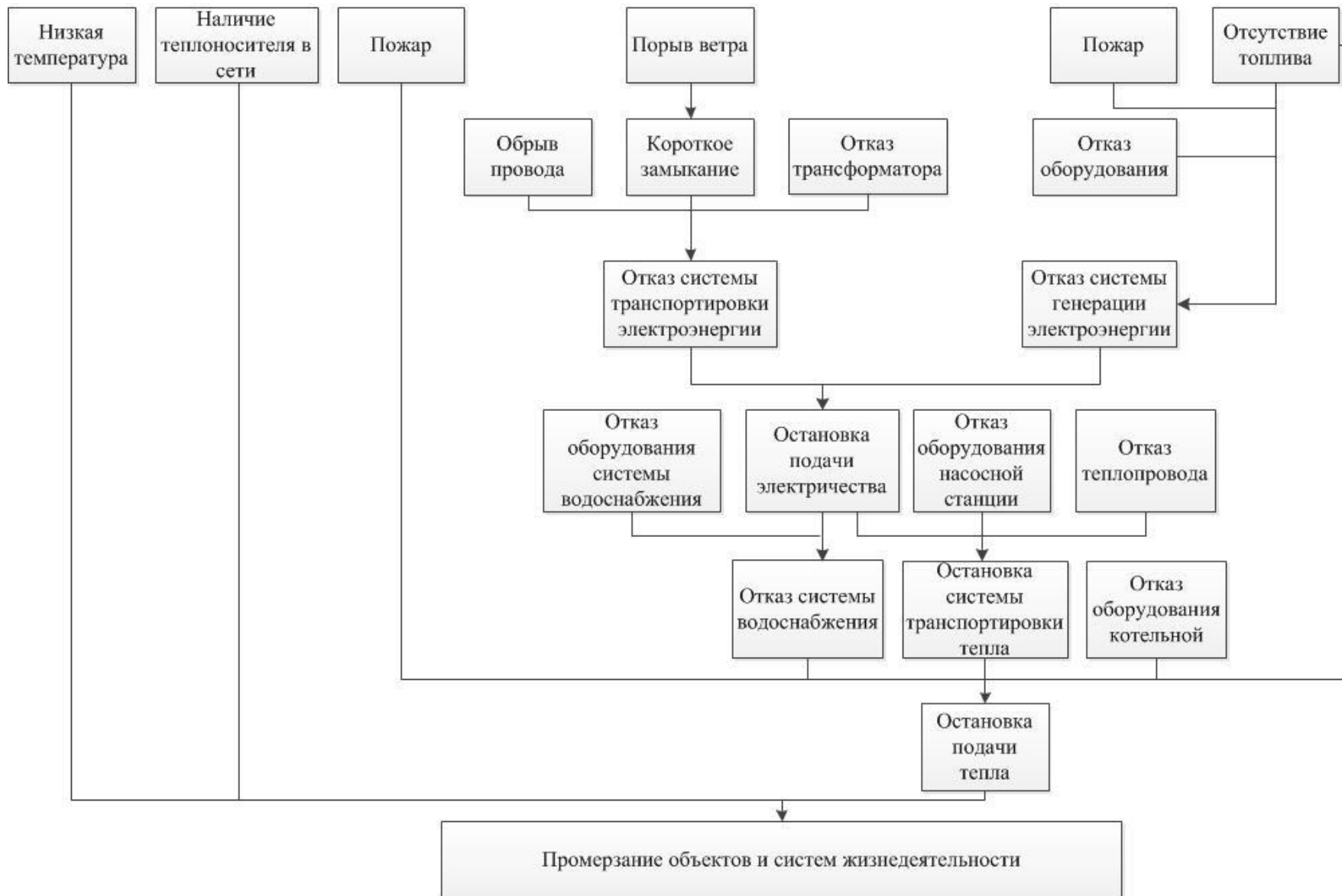


Рис. 7. Причинно-следственная структурная схема развития АС

следствие при появлении хотя бы одной из причин, таких как остановка системы транспортировки тепла, отказ оборудования котельной, пожар в котельной, отсутствие топлива и отказ системы водоснабжения. Только при совместном проявлении таких событий-причин, как «остановка подачи тепла», «низкая температура» и «наличие теплоносителя в сети» возможно событие-следствие, как «промерзание трубопроводов теплосети». Отказ в теплосети может вызвать промерзание объектов жизнедеятельности населения.

Для определения количественных показателей надежности системы теплоснабжения применяется метод дерева событий по ГОСТ Р 54142-2010 (рис. 8). За исходное событие принимается событие «низкая температура». Отказ в системе теплоснабжения чрезвычайного характера имеет место при низкой температуре, и частота АС повышается со снижением температуры наружного воздуха. За конечное событие принимается остановка подачи тепла, приводящая к промерзанию объектов жизнедеятельности. Далее определяются основные события, влияющие на протекание АС. События устанавливаются на основе анализа причинно-следственных связей развития АС (рис. 7). За возможные промежуточные события приняты: пожар, ограниченный запас топлива, отключение электропитания, остановка циркуляционных насосов, отказ системы водоснабжения, отказ оборудования котельной, отказ теплосети. Составленная причинно-следственная схема развития АС представляет собой разветвленную структуру. Имеются различные возможные варианты развития событий. Каждое событие потенциально может быть причиной события «промерзание объектов жизнедеятельности». Наименование событий каждого уровня вводится в таблицу. Количество независимых событий определяет уровень дерева событий, равный семи. Каждое событие рассматривается в двух альтернативных состояниях: произошел отказ или не произошел отказ. При этом предполагается, что время восстановления отказавших подсистем больше времени остывания воздуха в помещениях до температур замерзания теплоносителя. Каждое из этих событий в отдельности может привести к остановке подачи тепла с промерзанием объектов жизнедеятельности, если система транспортировки тепла своевременно не будет освобождена от теплоносителя (событие 7). Если система своевременно будет освобождена от теплоносителя, то реализуются множество различных последствий. Множество конечного состояния составляется на основе анализа описания АС. К ним относятся недоотпуск тепловой энергии, промерзание теплопровода, полное прекращение подачи тепловой энергии, замерзание зданий. Значимость и отличие конечного состояния определяется величиной ущерба. По данной методике составлено семиуровневое дерево событий (рис. 8), осуществляется логический перебор различных путей развития АС (ветвей дерева событий) и ее последствий. Суммировав исходы по разным возможным путям, можно получить вероятность конечного события. Для каждого потока событий будет своя вероятность реализации событий.

По формуле произведения вероятностей событий получается вероятность события остановки подачи тепла. В данном случае получается тринадцать различных вариантов несовместимых конечных событий. Сравнение их значений может помочь определить более ненадежные соотношения событий. Вероят-

Исходное событие	Событие А	Событие В	Событие С	Событие D	Событие Е	Событие F	Событие G	Вероятность	Конечное состояние
Низкая температура	Пожар в котельной	Ограниченный запас топлива	Отключение электроснабжения	Отказ циркуляционных насосов	Отказ системы водоснабжения	Отказ оборудования котельной	Отказ теплосети		

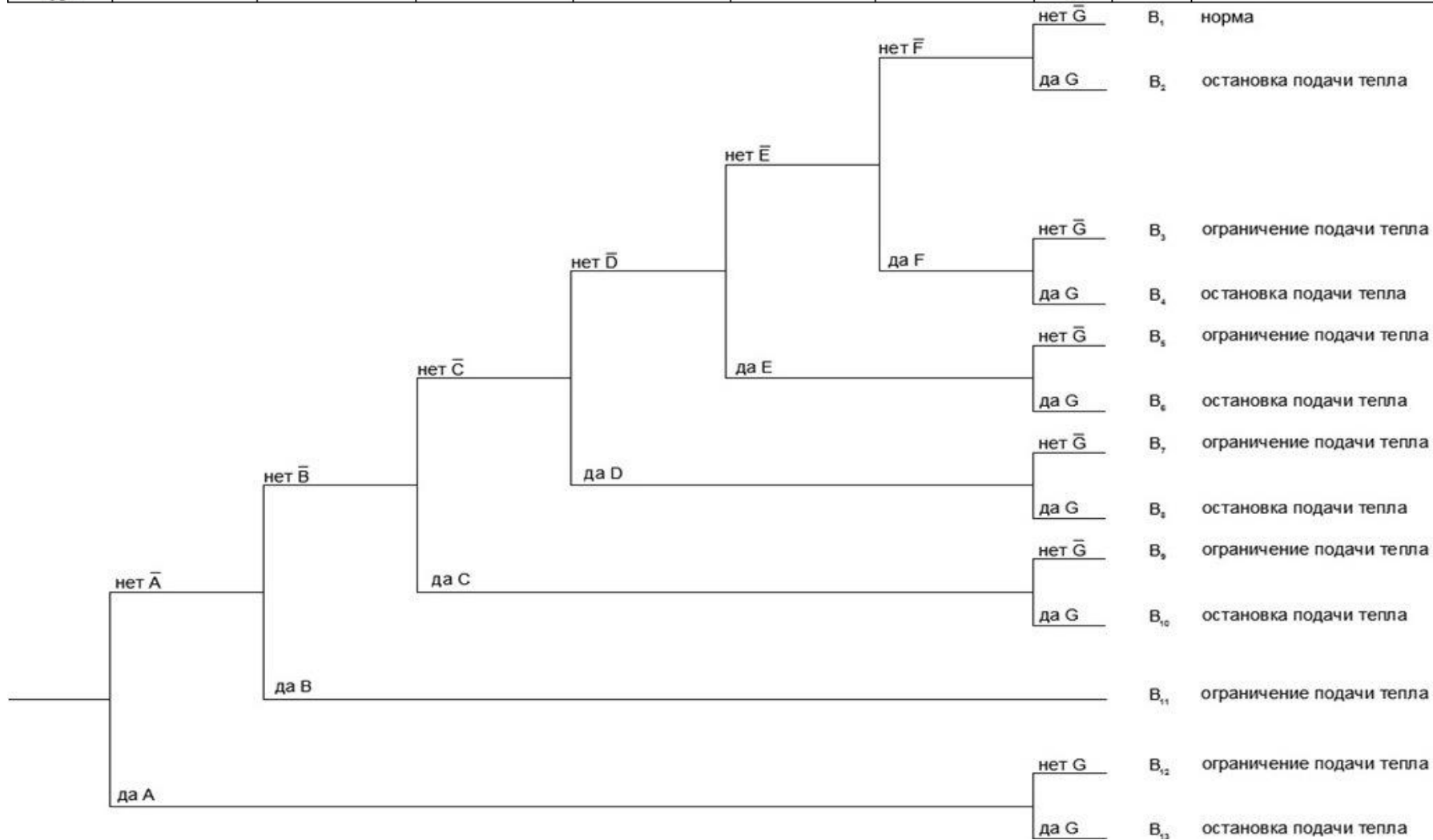


Рис. 8. Последствия АС в энергоснабжении децентрализованной СЭ

ности штатных условий эксплуатации (норма) и неблагоприятных событий (ограничение и остановка подачи тепла) в соответствии с рис. 8 будут определяться по формулам:

$$\begin{aligned} B_1 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_F \cdot P_G; & B_2 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_F \cdot Q_G; \\ B_3 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot Q_F \cdot P_G; & B_4 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot Q_F \cdot Q_G; & B_5 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot Q_E \cdot P_G; \\ B_6 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot Q_E \cdot Q_G; & B_7 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot Q_D \cdot P_G; & B_8 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot Q_D \cdot Q_G; \\ B_9 &= P_A \cdot P_B \cdot Q_C \cdot P_G; & B_{10} &= P_A \cdot P_B \cdot Q_C \cdot Q_G; & B_{11} &= P_A \cdot Q_B; & B_{12} &= Q_A \cdot P_G; & B_{13} &= Q_A \cdot Q_G. \end{aligned} \quad (1)$$

Для построения дерева событий необходимо определить, какие события или элементы объекта могут влиять на развитие АС. Для событий, влияющих на протекание АС, необходимо знать значения вероятностей отдельных событий. Определение вероятностей событий можно провести с применением различных методов, в том числе по известной статистике АС на однотипных объектах.

В четвертой главе получила развитие методика оценки безопасности систем децентрализованной энергетики Крайнего Севера. Проведен анализ составляющих ущерба при отказах. Для примера рассмотрим описание АС, происшедшей в поселке Депутатский 2 февраля 2001 года. При проведении сварочных работ возник пожар на ДЭС, огнем уничтожен силовой кабель и все одиннадцать дизель генераторов. Электроснабжение поселка было нарушено. Была остановлена центральная котельная, обеспечивающая теплом 26 жилых дома (1539 квартир, 3698 человек, в том числе 1208 детей) и 33 объекта производственного сектора и соцкультбыта. Население было эвакуировано в соседние населённые пункты и в г. Якутск. Ущерб составил более 40 млн. руб., относительный ущерб к МРОТ равняется $1,3 \cdot 10^5$. Потери потребителей определяются количеством потерпевших, температурным режимом, временем восстановления и наличием эвакуации людей.

На основе выше приведенного анализа последствий аварий, предлагается следующие классы тяжести последствий для децентрализованной СЭ:

1. Аварии местного характера. К АС с незначительной тяжестью последствий относятся отказы, приводящие к снижению объема потребления электро- и теплоэнергии, восстановление которых требует незначительных финансовых вливаний и времени восстановления, не приводящие к снижению качества жизни. Восстановление энергоснабжения возможно местными силами. К ним можно отнести отказы обеспечивающих элементов, например отказ насосов, выход из строя электродвигателя, неполадки в трансформаторе, отказ элементов дизельных станций. Время восстановления ограничивается временем более шести часов, но менее 24 часов. Снижение температуры в зданиях ограничивается выше критической ($t \geq t_{кр} = 12^\circ\text{C}$), но ниже комфортной (20°C). Относительный материальный ущерб к МРОТ находится в пределах $5 \cdot 10^3$. Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности не более 300 человек. Эвакуация населения невозможна.

2. Аварии территориального уровня. К АС со значительной тяжестью последствий можно отнести АС, приводящие к остановке подачи тепла в здания и снижению качества жизни населения. Такие отказы имеют место при остановке

подачи электричества, отказе системы водоснабжения, наличии топлива недостаточного объема или низкого качества, способствующие промерзанию теплотрассы и быстрому остыванию температуры зданий. Восстановление энергоснабжения возможно с участием территориальных сил. Время восстановления подачи тепла ограничивается тремя сутками. Температура в зданиях ниже критического значения ($t < t_{кр} = 12^{\circ}\text{C}$). Относительный материальный ущерб к МРОТ находится в пределах от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^5$. Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности от 300 до 500 человек. Число пострадавших (эвакуированных) от 50 до 100 человек.

3. Аварии регионального уровня. К АС чрезвычайной или высокой тяжести последствий можно отнести АС, приводящие к снижению качества жизни, промерзанию объектов жизнеобеспечения населения и эвакуации населения. Восстановление энергоснабжения возможно с участием региональных сил. Характеризуются значительным временем восстановления более трех суток. Полностью остановлена подача теплоэнергии, температура в зданиях ниже нуля. Относительный материальный ущерб к МРОТ принимается более $5 \cdot 10^5$. Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности более 500 человек. Число пострадавших (эвакуированных) более 100 человек.

По предложенной схеме тяжесть последствий отказов в СЭ северных населенных пунктов определяется тремя классами: незначительная, значительная и высокая. Классы устанавливаются комбинацией системы показателей. К ним относятся: материальный ущерб, время восстановления, температурный режим, количество людей с нарушенными условиями жизнедеятельности и число пострадавших (эвакуированных). Обоснование критериальных значений таких показателей как время восстановления, температурный режим проведено во второй главе. Значения относительного материального ущерба и количество пострадавших людей принимаются по данным, приведенным в «Положении о классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера». Число пострадавших людей при авариях СЭ будет определяться наличием эвакуации населения в другие населенные пункты. В случае ограничения тепла эвакуация отсутствует. С учетом проведенного экспертного анализа для каждого показателя выше качественно обоснованы, получены их граничные значения и приведены в табл. 5.

Таблица 5. Классификация аварий децентрализованных СЭ северных территорий по классам и критериям

№ п/п	Параметр	Класс аварийного состояния		
		местные	территориальные	региональные
1	Время восстановления, час	$6 < x_1 \leq 24$	$24 < x_1 \leq 72$	$x_1 > 72$
2	Температурный режим в зданиях, $^{\circ}\text{C}$	$20 > x_2 > 12$	$0 < x_2 \leq 12$	$x_2 \leq 0$
3	Ущерб относительно к МРОТ	$x_3 \leq 5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3 < x_3 \leq 5 \cdot 10^5$	$x_3 > 5 \cdot 10^5$
4	Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности, чел.	$x_4 \leq 300$	$300 < x_4 \leq 500$	$x_4 > 500$

5	Число пострадавших (эвакуированных)	-	$50 < x_5 \leq 100$	$x_5 > 100$
---	-------------------------------------	---	---------------------	-------------

При прогнозировании последствий аварийных ситуаций с целью обоснования превентивных мероприятий по снижению ущербов от АС используется метод макро моделирования. Согласно метода, уровни последствий АС оцениваются по обобщенным осредненным величинам показателей согласно табл. 5. По прогнозируемым уровням последствий отключения потребителей по параметру возможного числа людей с нарушенными условиями жизнедеятельности ориентировочно определяются другие показатели, такие как величина относительного ущерба и время восстановления энергоснабжения.

Методика определения обобщенного ущерба заключается в следующем:

- устанавливается возможное число людей с нарушенными условиями жизнеобеспечения при возможной остановке подачи тепла. Оно может быть определено количеством жителей, которые пользуются услугой обеспечивающей энергосистемы;

- по табл. 5 устанавливается вид возможного аварийного состояния при аварийной ситуации;

- по табл. 5 устанавливаются основные параметры возможного ущерба.

Повышение безопасности сложного технического объекта обеспечивается путем управления величиной риска. Задача выбора превентивных мер по снижению риска, определение потребных ресурсов, запасов решается моделированием всех возможных АС. Общая схема методики оценки безопасности децентрализованной СЭ заключается в следующем. Управление риском проводится минимизацией суммы затрат на мероприятия по снижению риска и на возможный ущерб при данном уровне риска. Величина риска как прогнозируемый ущерб определяется как произведение величины вероятности отказа системы на возможный ущерб при реализации неблагоприятного события.

Алгоритм методики оценки безопасности заключается в следующем: 1. Анализ существующего состояния СЭ; 2. Формирование возможных сценариев развития аварии и составление модели ее развития; 3. Расчет вероятности неблагоприятных событий; 4. Определение ущерба; 5. Оценка риска; 6. Выбор варианта развития СЭ.

Определение величины риска аварийных событий проводится через вероятности наступления неблагоприятных событий. Вероятность отказа системы подачи теплоэнергии определяется по методике, принятой на основе метода дерева событий. На рис. 8 приведено дерево событий, состоящее из семи уровней, включающим 13 возможных исходов, ветвей. Одно из них соответствует нормальному функционированию СЭ с вероятностью V_1 . Шесть возможных исходов приводят к полной остановке подачи тепла, шесть исходов приводят к ограничению подачи тепла. Суммировав все исходы событий, приводящих к АС, получим вероятность неблагоприятного события. Вероятность событий, приводящих к полной остановке подачи тепла:

$$Q_{ост} = V_2 + V_4 + V_6 + V_8 + V_{10} + V_{13}. \quad (2)$$

Вероятность событий, приводящих к ограничению подачи тепла:

$$Q_{огр} = V_3 + V_5 + V_7 + V_9 + V_{11} + V_{12}. \quad (3)$$

V_i определяются по зависимостям (1). Для каждого из двух последствий отказов СЭ определяются возможные величины ущербов. Аварии в СЭ сопровождаются с различной тяжестью последствий (табл. 5): незначительной, значительной и высокой.

Согласно табл. 5 для целей прогнозирования безопасности СЭ время восстановления энергоснабжения, материальную часть ущерба и число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности можно приближенно принять как максимально усредненные для каждого вида тяжести последствий при АС. Материальная часть ущерба определяется умножением относительного ущерба для каждого класса тяжести последствий на МРОТ. Первый класс тяжести отказов включает только ущерб от недоотпущенной энергии потребителям, второй класс - ущерб от недоотпущенной энергии потребителям и ущерб от возможного снижения качества жизни, третий класс включает и затраты на эвакуацию населения. По предложенной методике для всех возможных состояний при эксплуатации СЭ определяются параметры состояния.

Оценка риска АС проводится по следующему алгоритму:

Риск событий, приводящих к ограничению подачи тепла, равен:

$$R_1 = Q_{огр} \cdot Y_1. \quad (4)$$

Риск событий, приводящих к полной остановке подачи тепла равен:

- для значительных последствий

$$R_2 = Q_{ост} \cdot Y_2, \quad (5)$$

- при высоких потерях с эвакуацией

$$R_3 = Q_{ост} \cdot Y_3. \quad (6)$$

По данному алгоритму можно определить величину финансовых ресурсов необходимых для снижения аварийных рисков СЭ по РС(Я). На каждую котельную можно запланировать мероприятия по повышению безопасности в сумме равной риску событий.

Рассмотрим пример использования предложенной методики при прогнозировании риска АС. Из табл. 5 принимаются осредненные значения ущербов: $Y_1 = 5 \cdot 10^3 \cdot \text{МРОТ}$; $Y_2 = 5 \cdot 10^5 \cdot \text{МРОТ}$; $Y_3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \text{МРОТ}$. По данным вероятности отказов СЭ вычисляются вероятности событий по зависимостям (2) и (3):

- риск событий, приводящих к ограничению подачи тепла, равен:

$$R_1 = Q_{огр} \cdot Y_1 = 0,01285 \cdot (5 \cdot 10^3 \cdot \text{МРОТ}) = 64,25 \cdot \text{МРОТ};$$

- риск событий, приводящих к полной остановке подачи тепла равен:

1) для значительных последствий:

$$R_2 = Q_{ост} \cdot Y_2 = 0,0021 \cdot (5 \cdot 10^5 \cdot \text{МРОТ}) = 1050 \cdot \text{МРОТ};$$

2) при высоких потерях с эвакуацией:

$$R_3 = Q_{ост} \cdot Y_3 = 0,0021 \cdot (5 \cdot 10^6 \cdot \text{МРОТ}) = 10500 \cdot \text{МРОТ}.$$

Рассмотрим пути повышения безопасности СЭ путем резервирования. Риск событий, приводящих к ограничению подачи тепла при введении одного резервного насоса, равен: $R_{2,рн} = Q_{огр2} \cdot Y_1 = 0,0116 \cdot (5 \cdot 10^3 \cdot \text{МРОТ}) = 58 \cdot \text{МРОТ}$.

Безопасность СЭ по событиям, приводящим к ограничению тепла, при введении резервного насоса повышается на 10%. При планировании превентивных

работ по повышению надежности систем, например как показано путем резервирования, величина риска снижается за счет понижения вероятности отказа СЭ.

Предложенная методика оценки безопасности децентрализованных СЭ позволяет: оценить реальные уровни опасности объектов; выделить проблемные системы, вносящие наибольший вклад в опасность; оценить эффективность возможных мер повышения безопасности. Прогнозирование АС в системах инженерного обеспечения зданий позволит направить финансовые и материальные ресурсы на опасные объекты и участки, определить направление работ по реконструкции и реновации СЭ. Задача выбора превентивных мер по снижению риска, определение потребных ресурсов, запасов решается моделированием всех возможных АС.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. На основе анализа аварийности показано, что в условиях Крайнего Севера свойство безопасности систем энергоснабжения, как сложной, неоднородной и многофункциональной системы, является определяющим для их функционирования с учетом значительных социальных ущербов при авариях. При низких температурах безопасность системы оценивается через риск, как прогнозируемый экономический ущерб.

2. Определены и обоснованы основные показатели качества функционирования системы энергоснабжения в условиях Севера: время восстановления, температурный режим помещений, ущерб, число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности и число пострадавших (эвакуированных) людей. Установлены критериальные значения показателей для трех классов аварий (местные, территориальные, региональные): время восстановления ($6 < x_1 \leq 24$, $24 < x_1 \leq 72$, $x_1 > 72$), ч, температурный режим помещений ($20 > x_2 > 12$, $0 < x_2 \leq 12$, $x_2 \leq 0$), °С.

3. На основе изучения причинно-следственной схемы развития аварийных ситуаций построена вероятностная модель функционирования децентрализованной СЭ Севера. Предложенная методика позволяет определить вероятности аварийного состояния энергетических систем, выделить возмущения, которые могут привести к снижению качеству функционирования системы. Показано, что наиболее «слабым звеном» в энергетических системах и комплексах является транспорт тепла.

4. Разработана укрупнённая методика определения усреднённого удельного социально-экономического ущерба. Предложена классификация аварийных состояний ЭС циркумполярных территорий. Для предполагаемого класса аварий по значениям отдельных показателей установлен усредненный удельный ущерб ($5 \cdot 10^3 \cdot \text{МРОТ}$, $5 \cdot 10^5 \cdot \text{МРОТ}$, $5 \cdot 10^6 \cdot \text{МРОТ}$).

5. Разработаны алгоритмы и модели управления безопасностью в системах децентрализованной энергетики. Предложенная функциональная модель оценки безопасности объекта децентрализованной энергетики позволяет решить ряд практических задач по управлению риском при авариях путем обоснования эффективных мер по уменьшению последствий на социальную среду.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

в издании, входящем в международную базу данных Scopus

1. Prokhorov D.V., Phokhorov V.A. North Energy System Risk Analysis Features // Thermal Engineering. 2015. Vol. 62, No. 14. Pp. 1008–1011.

в журналах из Перечня рецензируемых научных изданий, рекомендованных ВАК:

2. Прохоров Д.В. Энергетическая безопасность населенных пунктов в условиях Крайнего Севера // Энергобезопасность и энергосбережение. – 2014. - №3. С. 5-7.

3. Прохоров Д.В. Моделирование надежности децентрализованных систем энергетики Севера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2014. - №3. С. 54-61.

4. Прохоров Д.В., Прохоров В.А. Особенности анализа риска систем энергетики Севера // Надежность и безопасность энергетики. – 2014. - №4. С. 2-6.

5. Прохоров Д.В., Прохоров В.А., Захаров В.Е. Классификация аварий чрезвычайного характера систем энергетики Севера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2015. - №5. С. 56-64.

6. Прохоров Д.В., Прохоров В.А., Петров Н.А. Надежность систем энергетики Крайнего Севера // Журнал Сибирского федерального университета. Техника и технологии. – 2017. - №8. С. 1007-1011.

статьи, опубликованные в других изданиях:

7. Прохоров Д.В. Состояние энергообеспечения децентрализованных потребителей Республики Саха (Якутия) // Труды XIV Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Нерюнгри: СВФУ, 2013. - С. 78-81.

8. Прохоров Д.В. Структурное моделирование надежности децентрализованных систем энергетики Севера // Методические вопросы исследования надежности больших систем энергетики. Вып. 65. Надежность либерализованных систем энергетики. - Иркутск, 2015. - С. 311-317.

9. Прохоров Д.В. Оценка надежности децентрализованных систем энергетики Севера // Научная конференция XVIII Лаврентьевские чтения. – Якутск: СВФУ, 2014 г. – С. 113-118.

10. Прохоров Д.В. Безопасность важнейшее свойство энергетической системы в условиях Крайнего Севера // Труды XVII Всероссийской научно-практической конференции молодых ученых, аспирантов и студентов. – Нерюнгри: СВФУ, 2016 г. - С. 78-81.

11. Прохоров Д.В. Вопросы резервирования децентрализованных энергетических систем жизнеобеспечения в условиях Севера // Труды VIII Евразийского симпозиума по проблемам прочности материалов и машин для регионов холодного климата EURASTRENCOLD - 2018. Том II. – Якутск, 2018 г. - С. 252-259.