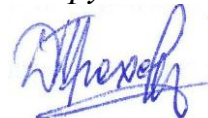


Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова
Сибирского отделения Российской академии наук

На правах рукописи



ПРОХОРОВ ДМИТРИЙ ВАЛЕРЬЕВИЧ

**ПОВЫШЕНИЕ НАДЕЖНОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЕВЕРНЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

Специальность 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель:
доктор технических наук, профессор
Петров Николай Александрович

Якутск – 2018

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	3
Глава 1. Оценка состояния и анализ аварийности энергоснабжения децентрализованных потребителей	9
1.1. Состояние энергоснабжения северных территорий.....	9
1.2. Аварии систем энергоснабжения Севера.....	17
1.3. Классификация аварий систем энергоснабжения.....	22
1.4. Методы определения и анализа надежности.....	29
1.5. Постановка задач исследования надежности децентрализованных энергетических систем.....	34
Глава 2. Системный анализ показателей безопасности энергетики в условиях Севера	36
2.1. Анализ системных свойств энергетики Севера.....	36
2.2. Выбор показателя безопасности систем энергоснабжения.....	45
2.3. Показатели качества функционирования систем энергоснабжения.....	50
Глава 3. Оценка надежности систем энергоснабжения Севера	61
3.1. Структурное моделирование вероятности аварийных событий.....	61
3.2. Определение вероятности аварийных событий.....	70
3.3. Резервирование надежности систем энергоснабжения.....	77
Глава 4. Методика оценки безопасности систем децентрализованной энергетики	83
4.1. Классификация аварийных ситуаций в системе децентрализованной энергетики Севера.....	83
4.2. Обобщенная методика определения ущерба.....	85
4.3. Алгоритм оценка риска децентрализованных систем энергоснабжения Севера.....	91
4.4. Прогнозирование риска аварийных ситуаций.....	95
Основные выводы и результаты работы	98
Список литературы	99
Приложение	111

ВВЕДЕНИЕ

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. 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 систем энергоснабжения в условиях Севера представляют собой многокомпонентную информацию, которые могут быть интерпретированы как результат натурного 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 экспортоориентированных 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.

Методика исследования. Для решения поставленных задач использованы методы: системного анализа, теории вероятностей и математической статистики, теории надежности, экономико-математического анализа. Собраны 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 энергетических систем 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. Структурно-вероятностный анализ развития аварий позволяет выделить «слабое звено» системы и дать рекомендации по разработке мероприятий, направленных на повышение ее безопасности.

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

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 III.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.). Разработаны методические указания, которые могут быть использованы организациями, занятыми проектированием и эксплуатацией ЭС в условиях Сибири, Крайнего Севера и Арктики.

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.

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.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Содержание работы соответствует паспорту специальности 05.14.01 – Энергетические системы и комплексы, входящей в номенклатуру диссертационного совета Д 212.099.07, и указанным в нём областям исследования:

П.1. Разработка научных основ исследования общих свойств, создания и принципов функционирования энергетических систем и комплексов, фундаментальные и прикладные системные исследования проблем развития энергетики городов, регионов и государства, топливно-энергетического комплекса страны;

П.3. Использование на этапе проектирования и в период эксплуатации методов математического моделирования с целью исследования и оптимизации структуры и параметров энергетических систем и комплексов и происходящих в системах энергетических процессов;

П.6. Исследование влияния технических решений, принимаемых при создании и эксплуатации энергетических систем и комплексов, на их финансово-экономические и инвестиционные показатели, региональную экономику и экономику природопользования.

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), 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 периодических изданиях из перечня ВАК; 1 статья в издании, входящем в базу цитирования Scopus; 1 статья в сборнике научных трудов; 4 – в материалах Всероссийских конференций.

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.

Глава 1. Оценка состояния и анализ аварийности энергоснабжения децентрализованных потребителей

1.1. Состояние энергоснабжения северных территорий

К северным арктическим регионам Российской Федерации относятся территории следующих регионов: Мурманская, Архангельская, Магаданская, северная часть Тюменской области, Ненецкий и Чукотский автономные округа, Красноярский край и Республика Саха (Якутия) [20]. Они имеют общие черты в своем хозяйственном комплексе: открытый выход к Мировому океану, большие запасы полезных ископаемых и биологических ресурсов, удаленность от основных промышленных и финансовых центров страны, высокие производственные издержки, связанные с тяжелыми климатогеографическими условиями ведения хозяйственной деятельности.

Проблемы децентрализованной энергетики рассмотрены в работах [25, 94, 102]. В работе [102] показано, что 31% электроэнергии в России производится децентрализованным способом. Районы децентрализованного энергоснабжения занимают около 60% территории России и находятся главным образом на севере страны. В зоне Российского Севера эксплуатируются более 12 тысяч дизельных электростанций (ДЭС) мощностью от 100 кВт до 3.5 МВт; средний расход завозимого дорогостоящего топлива составляет на каждой из них от 360 (на современных ДЭС) до 480 (на старых ДЭС) т у.т. К этим электростанциям следует добавить и почти такое же количество мелких котельных (только в районах Дальнего Востока их число достигает 5 тысяч). На Севере эксплуатируются две атомные станции — Кольская мощностью 1760 МВт (на ее долю приходится 48% суммарной мощности электростанций Мурманской области) и Билибинская на Чукотке мощностью 68 МВт. В энергетическом балансе Севера свыше 70% мощностей приходится на экологически «грязные», органические виды топлива — уголь, мазут и дрова, завоз которых весьма дорог. Поэтому все острее становится проблема

функционирования северной энергетики, которая должна стать более эффективной в экстремальных условиях Севера.

Проблемы децентрализованной системы энергетики в работе исследуется на примере Республики Саха (Якутия). Площадь территории Якутии составляет 3083,5 тыс. м² или 18% территории Российской Федерации, протяженность более чем 2400 км. Свыше 40% территории находится за Полярным кругом, более 80% - севернее 60° с.ш. Территория РС(Я) расположена в зоне Крайнего Севера и относится к районам с экстремальными природно-климатическими условиями. Климат Якутии отличается ярко выраженной резкой континентальностью. При отрицательной средней годовой температуре абсолютная амплитуда температур превышает 100°С, т.е. больше, чем где бы то ни было на земном шаре [13, 31, 57, 58, 114 и др.].

В состав РС(Я) входит 445 муниципальных образований, в том числе 34 муниципальных района, 2 городских округа, 48 городских и 361 сельское поселение. Численность населения в РС(Я) по состоянию на 1 января 2016 г. составляла 959,7 тыс. человек. В последнее время наблюдается тенденция к постепенному росту рождаемости, снижению смертности и увеличению продолжительности жизни населения. Территория РС(Я) характеризуется малой заселенностью: средняя плотность населения на 1 января 2016 г. составила 0,31 чел./кв. км, что в десятки раз ниже, чем в среднем по России. Основная часть населения (65,4 %) проживает в городах, количество городских жителей постоянно растет.

Электроэнергетика РС(Я) включает в себя зону централизованного и децентрализованного энергоснабжения. Зона централизованного электроснабжения состоит из трех энергорайонов – Западного, Центрального и Южно-Якутского. Централизованным электроснабжением охвачено 36% территории РС(Я), где проживает 85% населения.

Зона децентрализованного электроснабжения включает в себя обширную территорию РС(Я) с большим количеством автономных электростанций, которые снабжают отдельные поселки и горнодобывающие предприятия. Зона действия автономной энергетики охватывает площадь 2,2 млн км² (64%) с 15% проживаю-

щего в РС(Я) населения. Основная часть мощности автономных электростанций (более 200 МВт) расположена на территории так называемого Северного энерго-района, где потребители обеспечиваются электроэнергией от многочисленных автономных электростанций АО «Сахаэнерго».

Данные по населённым пунктам, находящимся в зоне децентрализованного энергоснабжения, приведены в таблице 1. Стоит отметить, что полностью в зоне децентрализованного энергоснабжения находятся 12 районов. (Абыйский, Аллаиховский, Анабарский, Булунский, Верхнеколымский, Верхоянский, Жиганский, Кобяйский, Момский, Оленекский, Среднеколымский и Эвено-Бытантайский). Остальные районы, представленные в таблице, частично находятся в зоне децентрализованного энергоснабжения.

Обширность обслуживаемой АО «Сахаэнерго» территории делает невозможным ее охват линиями электропередачи, а отсутствие крупных населенных пунктов и промышленных потребителей приводит к нецелесообразности строительства источников генерации большой мощности, вследствие чего энергоснабжение в целом носит социальный характер. Все дизельные электростанции работают на свои распределительные электросети, охватывающие территорию отдельного села или поселка.

В производственной деятельности АО «Сахаэнерго» «узкие места» обусловлены, так же, как и в энергосистеме, в основном, износом генерирующего оборудования, линий электропередачи и трансформаторных подстанций. Значительная часть оборудования введена в строй более 30–40 лет назад и выработала парковый ресурс. Вместе с тем эксплуатация энергооборудования осуществляется в сложных климатических условиях, что ведет к большим расходам по содержанию электросетей, ускоренному износу и дополнительным затратам.

На 2015 г. из общего количества генерирующего оборудования дизельных электростанций, состоящего из 670 единиц разных типов и модификаций, достаточно большое количество физически и морально устарело, имеют чрезмерно сложные, с низкой степенью надежности, системы возбуждения. Количество агрегатов, выработавших нормативный ресурс, в среднем составляет более 40%, а

по установленной мощности – около 20%. Это объясняется тем, что устаревшее оборудование имеет небольшую единичную мощность, при этом значительное количество из них превысило нормативный ресурс в 2–4 раза.

Таблица 1 - Площадь территории и численность населения по децентрализованным районам РС(Я)

№	Административный район	Административный центр	Площадь территории, тыс. км ²	Численность населения на конец 2015 г., тыс. чел.
1	Абыйский	пгт Белая Гора	69,4	4,1
2	Алданский	г. Алдан	156,8	40,5
3	Аллаиховский	пгт. Чокурдах	107,3	2,7
4	Анабарский	с. Саскылах	55,6	3,4
5	Булунский	пгт. Тикси	223,6	8,4
6	Верхневиллюйский	с. Верхневиллюйск	42,0	20,9
7	Верхнеколымский	пгт. Зырянка	67,8	4,3
8	Верхоянский	г. Верхоянск	137,4	11,4
9	Виллюйский	г. Виллюйск	55,2	24,8
10	Горный	с. Бердигестях	45,6	11,9
11	Жиганский	с. Жиганск	140,2	4,2
12	Кобяйский	пгт. Сангар	107,8	12,8
13	Ленский	г. Ленск	77,0	37,6
14	Момский	с. Хонуу	104,6	4,1
15	Нижнеколымский	пгт. Черский	87,1	4,4
16	Оймяконский	пгт. Усть-Нера	92,2	9,0
17	Олекминский	г. Олекминск	160,8	25,3
18	Оленекский	с. Оленек	318,1	4,0
19	Среднеколымский	г. Среднеколымск	125,2	7,5
20	Томпонский	пгт. Хандыга	135,8	13,2
21	Усть-Майский	пгт. Усть-Мая	95,3	7,3
22	Усть-Янский	пгт. Депутатский	120,3	7,2
23	Хангаласский	г. Покровск	24,7	32,3
24	Эвено-Бытантайский	с. Батагай-Алыта	52,3	2,8

На дизельных электростанциях установлены дизель-генераторы различных производителей: «Ярославский моторный завод», «Алтайдизель», «РУМО» (Русские моторы), ВДМ (Волжский завод им. Маминых), CUMMINS (Великобритания), CATERPILLAR (США) и другие.

В РС(Я) всего в эксплуатации находится 1853,5 км воздушных линий электропередачи напряжением 10-6-0,4 кВ. Электрические сети напряжением 35 кВ и выше АО «Сахаэнерго» не эксплуатируются. Большая часть линий введена в эксплуатацию в 1960-1980 гг. и имеет довольно большой процент износа.

Линии электропередачи 6-10 кВ протяженностью 705,1 км выполнены в одноцепном исполнении исключительно на деревянных опорах. В среднем износ составляет 64%. Линии напряжением 6 кВ имеют 70% износа.

Протяженность кабельных линий составляет 150,4 км, почти 50% из них приходится на п. Тикси. Эти линии проложены в период строительства поселка в 60-70-х годах, их физический износ – 100%. Ввиду несохранившейся технической документации о прокладке кабельных трасс, затруднен поиск и устранение повреждений.

По состоянию на 2015 г. более 48% общей установленной мощности трансформаторов, находящихся в ведении АО «Сахаэнерго», выработали нормативный ресурс. Средний износ трансформаторных подстанций составил 73%. В отдельных населенных пунктах в эксплуатации находятся трансформаторы, отработавшие 35–50 лет при нормативе 25 лет.

В системе энергоснабжения РС(Я), как и в других энергосистемах субъектов РФ, высок износ оборудования и электрических сетей. На протяжении долгого времени темпы старения основных производственных фондов значительно опережали темпы их обновления. Деятельность электросетевых компаний по реконструкции и техническому перевооружению направлена на поддержание работоспособности действующего оборудования, на продление его ресурса. Суровые климатические условия РС(Я) осложняют эксплуатацию электросетевого хозяйства и приводят к увеличению затрат на ремонт и восстановление. Незрелость электросетевой инфраструктуры, изолированность энергорайонов не позволяют

рационально использовать структуру существующего энергетического хозяйства РС(Я), обеспечить требуемую надежность энергоснабжения потребителей и создать конкурентную среду по производству электроэнергии на межсистемном уровне, что негативно сказывается на социально-экономическом развитии РС(Я) в целом. Все проблемные вопросы энергосистемы еще более остро проявляются в децентрализованной зоне, особенно в арктических районах. Высок износ зданий, сооружений и оборудования автономных энергоисточников, распределительных линий электропередачи. Функционирование электростанций характеризуется низкой эффективностью. Сложные схемы завоза топлива обуславливают высокие показатели стоимости топлива и, как следствие, себестоимости производства электроэнергии.

Проблемы в топливоснабжении электростанций децентрализованной зоны обусловлены:

- большой долей дизельного топлива – более 75% от общего потребления;
- сложной транспортной схемой доставки с несколькими перевалками на различные виды транспорта (морской, речной, автомобильный);
- досрочным завозом топлива и материально-технических ресурсов, связанным с короткими сроками навигации и труднодоступностью малых рек;
- необходимостью создания депонационных запасов дизельного топлива и материально-технических ресурсов, что ведет к замораживанию оборотных средств на срок до полутора лет.

В системах теплоснабжения в качестве проблемных моментов следует особо отметить низкую эффективность и технический уровень оборудования котельных и высокий износ тепловых сетей. В дополнение к значительной доле ветхого жилья, все эти проблемы приводят к большим потерям тепловой энергии при транспортировке и потреблении.

Накопившиеся технические проблемы в значительной степени связаны с тем, что развитие теплоснабжения в РС(Я), как и в стране, многие годы было ориентировано на упрощенные и наиболее дешевые решения: элеваторное присоединение отопительной нагрузки, открытый водозабор, тупиковые схемы тепловых

сетей, ненадёжные теплопроводы и арматура, неавтоматизированные котельные. Местное автоматическое регулирование в установках потребителей и измерение потребляемого в них тепла не осуществляется.

Современная ситуация в сфере теплоснабжения РС(Я) характеризуется серьёзными проблемами, состоящими в изношенности оборудования, низкой эффективности и надёжности, неудовлетворительном уровне комфорта в зданиях; низком техническом уровне и низкой экономической эффективности систем и объектов теплоснабжения; огромных непроизводительных потерях тепловой энергии.

Основные проблемы в сфере теплоснабжения и теплопотребления:

1. Неудовлетворительный технический уровень, обусловленный недостаточной оснащённостью автоматикой, системами учета и регулирования, износом основных фондов. Устаревшие технические решения не позволяют эффективно транспортировать и использовать тепловую энергию, что приводит к огромным перерасходам топлива и энергии; к неприемлемо низкому качеству теплоснабжения, низкой его надёжности, частым тепловым авариям; к чрезмерно высоким издержкам в системах теплоснабжения.

2. Низкий уровень оснащённости централизованным теплоснабжением. В большинстве районов отсутствует возможность по предоставлению услуг централизованного теплоснабжения, водоснабжения и водоотведения, что негативно отражается на качестве жизни населения. В настоящее время оборудование жилого фонда составляет:

- централизованным теплоснабжением – 62,8 %;
- горячим водоснабжением – 50,7 %;
- водопроводом – 54,1 %;
- канализацией – 54,0 %.

3. Низкая эффективность котельных. Сверхнормативные расходы топлива (200-280 кг у.т./Гкал) обусловлены низкой эффективностью работы котельных. При нормативном КПД угольных котельных 80 %, их фактическое значение по данным обследования составляет 50-60 %. Основными причинами низкой энерге-

тической и экологической эффективности котельных являются: плохое техническое состояние и значительные конструктивные недостатки топок и котлов в целом; отсутствие режимных карт, систем автоматики и механизации топочных процессов; некачественное ведение процесса сжигания топлива; длительная эксплуатация котлов на низкой нагрузке (15-40 % от номинальной). Некоторые из этих недостатков характерны и для мазутных котельных, КПД которых находится в пределах 70-84 % вместо проектных 88-90 %; КПД газовых котельных не превышает 80 %.

4. Значительный износ оборудования и тепловых сетей в связи с несвоевременным их ремонтом и заменой. В настоящее время уровень износа коммунальной инфраструктуры составляет 53%, в отдельных системах он превышает 70 %.

5. Большие потери тепловой энергии в трубопроводных сетях. Эффективность систем транспорта в РС(Я) в последние годы снижается, что связано с высоким износом тепловых сетей и нерациональными режимами их эксплуатации. Потери в тепловых сетях продолжают возрастать, в среднем по системам РС(Я) в 2015 г. они составили около 25 %, в ряде районов уровень потерь достигает 32-41 %. Их рост в основном связан со старением оборудования тепловых сетей (ухудшением качества тепловой изоляции и гидравлической плотности коммуникаций).

6. Высокая степень износа жилищного фонда. Удельный расход тепловой энергии на отопление жилых зданий характеризуется широким диапазоном значений от 0,17 Гкал/м² до 0,91 Гкал/м² в год. Высокий уровень расхода тепловой энергии связан со значительным износом жилого фонда. Республика Саха (Якутия) входит в число регионов Российской Федерации с наибольшим удельным весом ветхого и аварийного жилья – 16,6 %. Одной из причин высокой доли ветхого жилья является то, что больше половины жилищного фонда РС(Я) является деревянным (58,2 % от общей площади) и только чуть более трети (40,1 %) в каменном (кирпичном, панельном, блочном, монолитном) исполнении [106].

Климатические особенности РС(Я) требуют повышенной надежности и работоспособности инженерных систем жизнедеятельности населенных пунктов. Анализ климатологических данных для проектирования систем теплоснабжения

показывает, что в РС(Я) очень низкие не только расчетные температуры наружного воздуха, но и среднегодовые температуры. Продолжительность отопительного периода в отдельных местах достигает 365 суток, т.е. он фактически является круглогодичным. Сопоставление климатических характеристик, определяющих расчетные часовые и годовые расходы тепла на отопление в различных регионах России и Дальнего Востока, показывает, что даже г. Якутск, который является городом не с самыми низкими температурами в РС(Я), относится к наиболее холодным городам Дальнего Востока.

В условиях низких температур интенсивность поломок техники возрастает [22, 38]. В условиях Якутии энергетические затраты организма человека в покое составляют 3200-4500 ккал, а у жителей г. Москва - 1600-2200 ккал. Это показывает сильное напряжение организма человека в условиях Севера. В условиях Севера климатогеографические факторы действуют отрицательно на всех одинаково, но ответные реакции организма человека на внешнее воздействие условий совершаются в зависимости от уровня адаптации и социальной защищенности.

1.2. Аварии систем энергоснабжения Севера

В настоящее время неблагоприятные воздействия объектов энергетики (ОЭ) на людей и окружающую среду при их сооружении и функционировании достигли таких масштабов, что вынуждают рассматривать проблему безопасности ОЭ как чрезвычайно важную. Примеры крупных аварий со значительными материальными и социальными ущербами, которые произошли в последние десятилетия в системах энергоснабжения ряда населенных пунктов РС(Я), свидетельствуют о том, что эта проблема сохраняет особую актуальность [5].

Большое значение для разработки стратегии управления функционированием СЭ и повышения точности анализа имеет создание баз данных по отказам, а также повышение качества сбора первичной статистической информации. Для того чтобы представить причины и последствия при АС, рассматриваются некоторые описания аварий, произошедших в РС(Я). Для анализа подобраны примеры, в

которых содержатся более полные описания разнообразных взаимосвязанных причин и следствий аварий. Далее приводятся некоторые из них:

1. 7 апреля 1999 года в п. Суордах в 23 часа 30 минут из-за короткого замыкания сгорело три дизель-генератора. Население в количестве 500 человек осталось без света;

2. 27 февраля 2001 года в п. Чапчылган в 21 часов произошел взрыв котла №1 на квартальной котельной, работающей на сырой нефти. Котельная была оборудована 4 котлами КСВ - 1,25. В результате взрыва возник пожар;

3. 31 декабря 2001 года в п. Сангар была остановлена котельная «Новая» по причине отсутствия воды, в результате был заморожен водовод до котельной длиной 300 м и водовод от пожарной ёмкости до котельной длиной 100 м, также пострадало 58 объектов жилого фонда и 26 частных жилых дома, было разморожено 2200 метров теплотрассы. Ущерб составил 8,0 млн руб.;

4. В п. Тикси 6 февраля 2013 года в 11 часов 15 минут по причине отказа автоматики горелки Oilon-800, произошла остановка котла №1 марки «FR-10». В результате чего в работе остались два котла марки «ДКВР». Коммунальными службами горелка была заменена на форсунку «Р-200», но замена не дала нужного эффекта. С понижением температуры теплоносителя жителями был произведен слив воды из системы отопления. По причине массового слива теплоносителя произошло завоздушивание трубы, в результате чего частично нарушилось теплоснабжение по стоякам отопления и холодного водоснабжения в девяти жилых домах. Ремонты по отогреву стояков начали с 6 февраля и продолжались до полного восстановления теплоснабжения данных объектов. К 6 часам 12 февраля 2013 года работа системы теплоснабжения восстановлена.

С целью анализа АС в системе энергоснабжения РС(Я) были собраны материалы аварий по данным министерства чрезвычайных ситуаций РС(Я) и создана база данных [83]. По проведенному анализу АС установлено, что в течение десяти лет (с 1998 по 2008 гг.) на ОЭ произошла 291 авария.

Данные аварий по годам приведены на рисунке 1, по месяцам – на рисунке 2. Аварии и АС наблюдаются каждый год без исключения и их динамика разно-

образна. Вероятно, что какой-либо закономерности в распределении аварий по годам нет. Наибольшее количество аварий наблюдалось в 1998, 2001, 2006 годах, наименьшее – в 2003г. На территории РС(Я) в год возникает около 30-ти аварий и АС на объектах жизнеобеспечения и ЭС. Интенсивность аварий повышается при низких температурах, т.е. в самые холодные месяцы отопительного зимнего периода (декабрь, январь).

Одной из главных причин выхода из строя оборудования являются отказы. Возникновение отказа из-за износа или повреждения в технических системах является случайным событием. Например, отказ котла может произойти из-за выхода из строя датчика контроля пламени. Остановка подачи электричества происходит из-за обрыва кабеля, падения опор электролиний, короткого замыкания, неполадок трансформатора, из-за отказа элементов дизельных станций. Причиной отказа оборудования может быть отказ обеспечивающих элементов, например отказ насосов может произойти из-за падения напряжения в сети, выхода из строя электродвигателя или поломки других элементов. Резервные устройства во многих случаях отсутствуют или бывают неготовыми к срочному включению. Система водоснабжения и котельная одновременно зависят от системы электроснабжения и могут привести к остановке подачи тепла. Также встречаются случаи отказа электростанций и отказа котельных из-за нехватки топлива, использования некачественного топлива, из-за поломки транспортной линии углеподачи, отрыва топливного шланга и т.д.

Для того чтобы выделить наиболее опасный элемент в системе энергоснабжения представляется распределение аварий по основным системным элементам. Данные об авариях по системным элементам представлены на рисунке 3. Первопричина АС может возникать во всех основных элементах системы энергоснабжения.

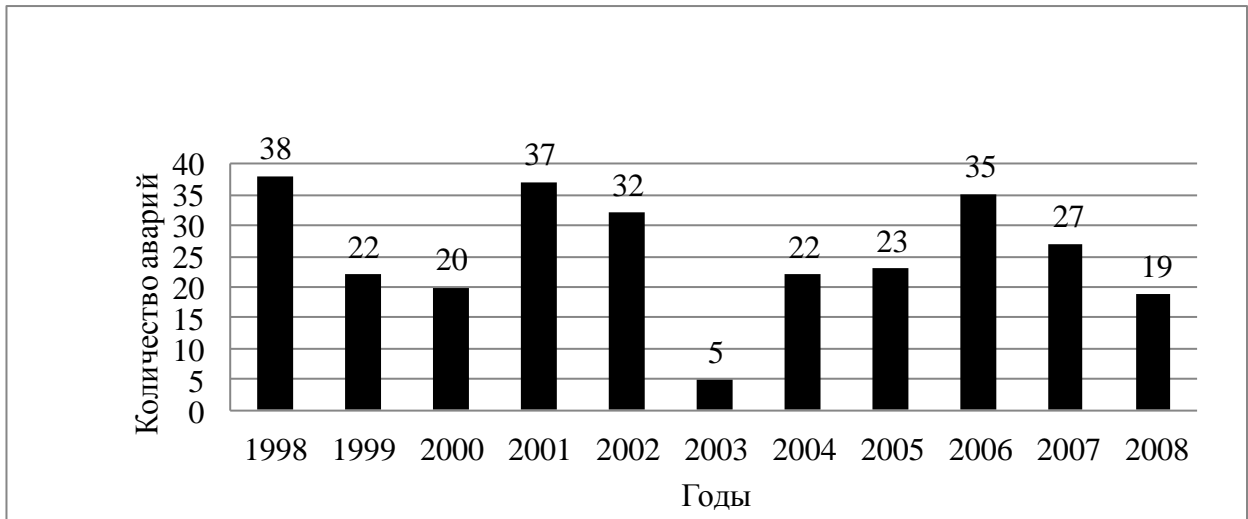


Рисунок 1 - Распределение аварий на объектах энергоснабжения по годам

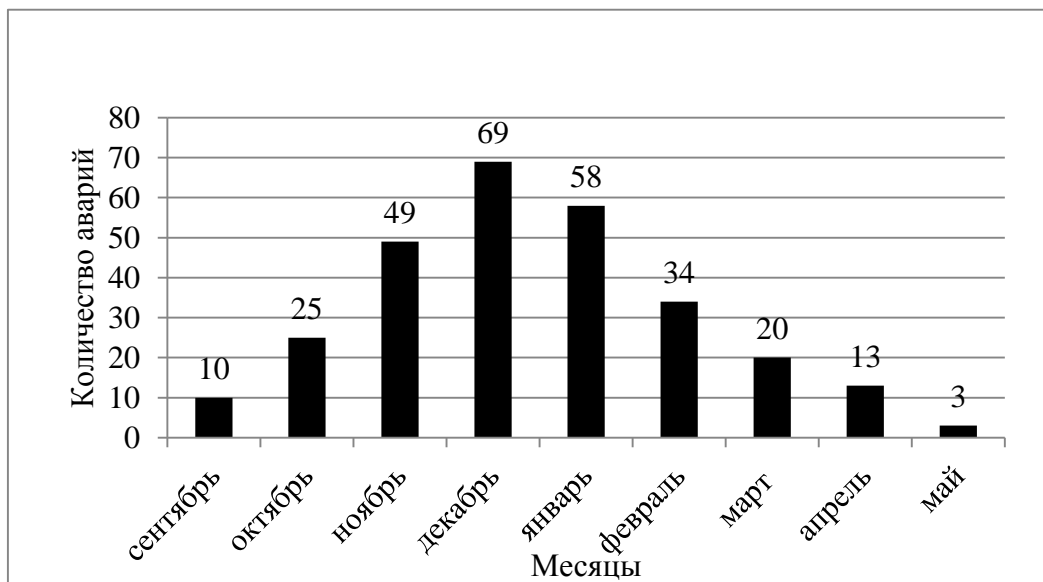


Рисунок 2 - Распределение аварий на объектах энергоснабжения по месяцам

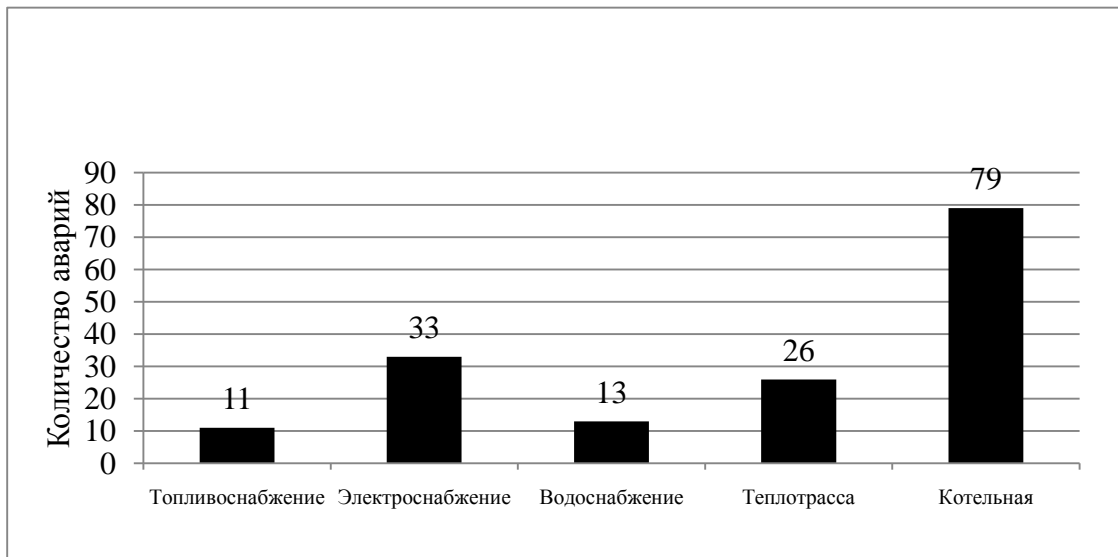


Рисунок 3 - Распределение аварий по системным элементам

Климатические явления являются одной из причин отказа элементов системы. Под действием сильного ветра может произойти падение опор электролиний, обрыв линий, короткое замыкание. Неисправность системы водоснабжения может произойти из-за утечек воды на теплотрассах, ограниченного количества воды в глубокой скважине, понижения уровня рек, промерзания водовода. Протяженность теплотрасс может составлять десятки километров. В условиях низких температур и в ночное время слив воды из трубопровода не всегда обеспечивается, и как показывают описания аварий, не всегда удастся предотвратить промерзание теплопровода. Низкая температура способствует промерзанию теплосети и быстрому остыванию температуры зданий. Из описаний АС видно, что отказы системных элементов взаимосвязаны. Авария в одном объекте может сопровождаться каскадным развитием, приводящим к массовому нарушению подачи энергии потребителям, и в совокупности повышают чрезвычайность АС (таблица 2). В случае неблагоприятного воздействия одного или нескольких факторов происходит развитие аварии системы энергоснабжения, причем зачастую наблюдается синергетический эффект [72]: единичный отказ может быть причиной выхода из строя и отказу других элементов подсистем, что может приводить к катастрофическим последствиям. 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 2, наиболее слабым звеном системы энергоснабжения является система теплоснабжения и тепловые сети. Анализ описаний аварий показывает, что высокие ущербы имеют место при полном замораживании теплопроводов. Следовательно, живучесть этой системы не обеспечивается.

Проведенный анализ показывает, что тенденция к сохранению высоких значений риска аварий в системах энергоснабжения обусловлена, главным образом, следующими причинами:

1. Влияние климатических условий на особенность эксплуатации инженерных систем (низкая температура, порывы ветра, паводок, оттайка мерзлых грунтов оснований объектов энергетики);
2. Высокий износ инженерных систем и оборудования;
3. Недостаточный уровень развития системы управления безопасностью при эксплуатации электрических, водопроводных и тепловых сетей;
4. Низкая квалификация обслуживающего персонала или так называемый «человеческий фактор».

Таблица 2 - Каскадное развитие аварий

	Всего аварий	Топливо-снабжение	Электро-снабжение	Водо-снабжение	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	-

1.3. Классификация аварий систем энергоснабжения

При функционировании СЭ Севера происходят различные нарушения её работоспособности. Нарушения в работе элементов системы примем как неблагоприятные события. К неблагоприятным событиям в общем случае относятся повреждения, аварии, катастрофа [7, 24, 52]. В зависимости от значимости послед-

ствий для общества и природной среды события определяются как аварийные события (АС). В общем случае для обозначения неблагоприятного события используется понятие отказ, как событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, после которого он перестает полностью или частично выполнять свои функции. А повреждение рассматривается как событие, заключающееся в нарушении исправного состояния объекта при сохранении работоспособного состояния. Повреждение элементов системы при развитии может привести к отказу объекта. Таким образом, аварии и катастрофы можно отнести к отказам чрезвычайного характера, но четкой границы между аварией и катастрофой нет. Они отличаются уровнем последствий для социальной системы. Выход систем энергоснабжения из строя происходит по многим причинам. Возникновение повреждения или отказа в инженерных системах является случайным событием, хотя вероятность повторений велика. Также к авариям относятся события, связанные с пожарами, взрывами на энергетических котлах, сопровождающиеся разрушением зданий котельных.

Отказы в системе энергетики Севера можно отнести по последствиям к авариям, так как они вызывают в основном прекращение подачи энергии. Так как населенные пункты на Севере обеспечиваются небольшими системами энергетики, чрезвычайные события можно отнести к авариям, а не к катастрофам. Отказы в виде аварий необходимо классифицировать по степени тяжести, развить на некоторые классы с близкими характеристиками.

В работе В.В. Лесных [42] приведен анализ системы разделения отказов и аварий. Величина ущерба изменяется в очень широких пределах для разных сценариев развития аварий. Поэтому их разделяют на различные классы по степеням существенности отказов по различным показателям.

В работе В.П. Васина и В.А. Скопинцева [9] граничные условия описаны качественно через ущерб при отказах следующим образом:

- при $A_b \leq Y_b < B_b$ рассматриваемое событие есть отказ;
- при $B_b \leq Y_b < C_b$ рассматриваемое событие есть авария;
- при $C_b \leq Y_b$ будет АС.

Граничные значения A_b , B_b , C_b , для разных параметров b различны и задаются нормативным путем. Такая классификация отказов в общем случае для системы энергетики Севера допустима и подходит, однако граничные значения должны определяться в соответствии с реальными данными. Отказы оборудования, аппаратуры, приборов по причине износа, повреждений, технологических нарушений случаются всегда, но их последствия могут быть разными.

В постановлении Правительства РФ «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [79] АС классифицируются по степени тяжести на шесть классов, в том числе на локальные, местные, территориальные и региональные, федеральные и трансграничные. Каждый j -й ($j=1, \dots, 6$) класс выделяется с помощью четырех параметров (таблица 3), определенных на непрерывном множестве состояний и характеризующих последствия АС: x_1 – число пострадавших; x_2 – число людей, у которых оказались нарушены условия жизнедеятельности; x_3 – размер материального ущерба (в единицах МРОТ); x_4 – размер зоны распространения поражающих факторов АС. Для каждого параметра приведены их граничные значения.

Таблица 3 - Критерии классификации АС по степени тяжести.

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.	≤ 100	$100 < x_2 \leq 300$	$300 < x_2 \leq 500$	$500 < x_2 \leq 10^3$	$x_2 > 10^3$	-
Ущерб, МРОТ	$x_3 \leq 10^3$	$10^3 < x_3 \leq 5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^3 < x_3 \leq 5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^5 < x_3 \leq 5 \cdot 10^6$	$x_3 > 5 \cdot 10^6$	-
Размер зоны	$0 \leq x_{4л}$	$x_{4л} < x_4 \leq x_{4м}$	$x_{4м} < x_4 \leq x_{4т}$	$x_{4т} < x_4 \leq x_{4р}$	$x_{4р} < x_4 \leq x_{4ф}$	$x_4 > x_{4ф}$

Приведенные критерии классификации аварийных ситуаций справедливы для всех сложных технических системах, в том числе и систем энергетики. В рас-

смотрение введены только общие параметры, которые для конкретной области требуют уточнения и обоснования. В классификации аварийных ситуаций выделены шесть классов, которые определяются по степени их тяжести и с учетом сил и затрат, необходимых для их устранения.

Тяжесть аварий определяется возможными ущербами. Величина ущербов зависит от комплекса обстоятельств. Классификация ущербов проводится по признаку субъектов: ущерб самой энергетической системы, ущерб потребителей, ущерб смежных звеньев. Косвенные убытки из-за снижения прибыли, затрат от простоя на производстве не учитываются. В состав ущерба производственной части входят:

1. Потери ресурсов при отказах;
2. Затраты на уменьшение потерь ресурсов при отказах;
3. Затраты на компенсацию негативных последствий отказов.

К потерям ресурсов относятся уничтоженная часть средств производства, рабочего времени, готовой продукции. К затратам на уменьшение потерь ресурсов при отказах относятся создание резервов производственной мощности, мероприятий по защите окружающей среды.

В литературных источниках информации по составляющим ущерба ограничены. Это объясняется тем, что получение информации сопряжено с очень сложным обследованием реальных потребителей. Методика стоимостного выражения негативного воздействия аварий на окружающую природную среду, ущерба на жизнь и здоровью населения, экономических потерь в случаях эвакуации населения приведена в работе В.В. Лесных [42].

Аварии в условиях севера сопровождаются значительными ущербами. Для примера приведены описание и величины ущерба при авариях систем энергоснабжения населенных пунктов Севера в 2002 году (таблица 4). Наряду с материальными потерями в виде выхода из строя разного оборудования объектов энергетики, зданий и сооружений, а также стоимости его восстановления, аварии сопровождаются остановкой или снижением энергоснабжения, эвакуацией населения в другие населенные пункты. Например, при аварии в п. Тикси-3, произошедшей 10

декабря 2014 года из-за выхода из строя основного и резервного насосного оборудования системы водоснабжения, была остановлена работа водонасосного комплекса. В результате был заморожен магистральный водовод, протяженностью 7,5 км. Подвоз воды на объекты теплоснабжения осуществлялся водовозной техникой. Три котельные обеспечивали теплоснабжением 9 жилых многоквартирных дома, где проживало 456 человек и социальные объекты. В результате аварии произошло ограничение подачи тепла. Восстановление теплоснабжения объектов и теплотрассы продолжалось до 31 января и для этой цели были осуществлены четыре специальных авиарейса из г. Якутска.

Таблица 4 - Ущерб при авариях

Дата и место аварии	Ущерб, тыс. руб.	Социальный ущерб (аварийные объекты)
10.02.02 г. Среднеколымск	17,7	Жилой фонд, детский сад
04.03.02 с. Кемпендяй	46,8	Детский сад на 50 мест, здание АТС, администрация села
11.10.02 с. Хоро	15,2	Школа, мастерская школы, детсад
28.11.02 п. Солнечный	3362,6	89 жилых домов, детский сад, школа
7.12.02 с. Кэрдэм	1556,4	Клуб, детский сад, спортзал, интернат, гараж
28.12.02 с. Саскылах	1120,9	47 частных дома, 13 муниципальных домов, 2 школы, детсад

В общем случае, ущерб разделяется на материальную, социальную части и расходы на восстановление. Социальные ущербы определяются не только снижением отпуска электроэнергии и понижением температуры в жилых зданиях, но и вынужденной эвакуацией жителей в другие населенные пункты.

Интенсивность аварий чрезвычайного характера со значительными ущербами повышается при низких температурах. Аварии, происходящие в зимний период с критически низкими температурами наружного воздуха, сопровождаются огромными ущербами материального и социального характера. На Севере восстановительные работы в зимнее время являются довольно продолжительными и требуют больших финансовых расходов. При низких температурах величина ущерба может увеличиться на несколько порядков по отношению к её материальной составляющей первопричины отказа. К материальным и социальным ущербам аварий, которые происходят в населенных пунктах, расположенных в труд-

недоступных районах РС(Я), добавляются расходы на перевозку пострадавшего от места аварии до места эвакуации – другого населенного пункта, и их содержание в период ликвидации последствий от аварии. При этом потери от заморозения объектов и социальные потери от эвакуации населения могут быть на порядок больше, чем материальные потери от отказа оборудования.

Анализ последствий аварий на Севере показывает, что гибель людей является очень редким событием и происходит в основном из-за пожаров в котельных. В таких событиях причина в основном связана с функционированием системы энергетики, а не связана с потребителями. Также следует отметить, что для небольших СЭ Севера экологические потери несравнимо малы с основными экономическими потерями. Они имеют место в процессе функционирования, а при авариях системы энергетики их доля незначительная и можно их не учитывать. Также при подсчете ущерба обычно не учитываются моральные потери. Поэтому для целей сопоставления эффективности мер по повышению безопасности СЭ предлагается пренебречь этими потерями при определении относительного ущерба. Величины указанных ущербов СЭ Севера не сравниваются с потерями при авариях таких объектов, как шахты, нефтепроводы, отказы которых сопровождаются гибелью людей, большими экологическими катастрофами.

Определение величины ущерба является сложной неопределенной задачей. Во многих описаниях аварий в системе энергетики отсутствуют данные по определению величины ущерба. На практике в основном определяется материальная часть ущерба. В ЭС Севера нет практики определения потерь от недополучения энергии, ущербов морального характера, утраты здоровья. Одним из значимых частей ущерба энергоснабжения Севера является утрата здоровья. Нахождение людей в жилых домах при температуре от нуля до нормальной температуры, реализуемой при АС, является довольно частым событием. При этом происходит снижение качества жизни населения, результатом которого могут быть различные заболевания, однако, методик оценки снижения качества жизни при нахождении людей в некомфортных для проживания температурах нет. Таким образом, социальный ущерб заключается в увеличении заболеваемости, снижения физического

развития и общей продолжительности жизни, сокращения периода активной деятельности, ухудшения условий труда и отдыха населения, снижения возможности творческого развития личности.

Существуют два подхода определения экономического ущерба от отказов [53]. Первый (микро моделирование) основан на последовательном подсчете всех потерь и затрат, являющихся следствием отказа. По своей сути этот подход не может быть применен в задачах прогнозирования. Применяется в области страхования ущерба при авариях. Все потери и затраты тщательно определяются после АС. Такие расчеты нужны для определения возможных предельных значений ущербов.

Второй (макро моделирование) подход основан на использовании удельных характеристик ущерба, определяемых с той или иной степенью приближения, отнесенных в пределах типа технологического производства. Макро моделирование ущерба применяется, когда последствия отключения потребителей известны ориентировочно, основывается на достаточно ограниченных данных, позволяет получить приближенные значения ущерба. Макро моделирование ущерба применяется при обобщенных оценках.

Для прогнозирования риска аварии конкретного пункта теплоснабжения расчет по усредненному значению даст большие ошибки. Для придания универсальности при оценке ущерба можно применить удельный ущерб. В общем случае ущерб зависит от объема потребляемой энергии, количества потребителей, времени восстановления и длины теплотрасс системы теплоснабжения. Эту зависимость можно определить количеством реализуемой энергии. Поэтому определяется удельный усредненный ущерб, который вычисляется как ущерб, приходящийся на единицу реализуемого тепла. Тогда ущерб для системы теплоснабжения определяется умножением усредненного удельного ущерба на количество нереализованного тепла. Методика определения ущерба через усредненный удельный ущерб принимается за основу [1, 89].

1.4. Методы определения и анализа надежности

Системы энергетики северных населенных пунктов являются в основном децентрализованными, многофункциональными и многокомпонентными. Важной задачей исследования является определение показателей надёжности СЭ. С этой целью необходимо определиться с методами определения надежности, применительно исследуемого объекта.

Для анализа надежности сложной системы применяются различные методы [69, 91, 92, 117]:

- по известной статистике аварийных событий на однотипных объектах (имевших место в прошлом);
- путем графоаналитического исследования структуры причинно-следственных связей факторов, приводящих к аварии;
- способом экспертных оценок;
- путем экспресс-анализа наблюдаемых параметров функционирующего объекта.

СЭ Севера состоит из сложных подсистем, при этом в работе надежность каждой подсистемы детально не рассматривается. В этой связи для оценки надежности подсистем более подходит метод анализа надежности по известной статистике аварийных событий на однотипных объектах. В работе для анализа надежности подсистем используются статистическая информация по аварийности в условиях Севера, литературные данные по отказам однотипных объектов и данные по отказам объектов энергетики эксплуатирующих предприятий. Если при исследовании база данных недостаточна, то следует использовать данные об отказах аналогичного оборудования в рассматриваемой отрасли промышленности. Анализируя имеющиеся статистические данные об отказах, можно оценить и вероятность возникновения неблагоприятных событий, и размеры ущерба. Этот метод подходит в основном для частых и однородных событий [87].

Таким образом, для однородных объектов характеристики надежности можно оценивать вероятностными показателями по теории случайных событий [7]: технический риск – параметр потока аварий (плотность вероятности аварии, вероятность аварии на одном объекте в единицу времени):

$$\omega = \frac{n}{N \cdot \Delta \tau}, \quad (1.1)$$

где ω – параметр потока аварий; n – число объектов, на которых произошла авария за период $\Delta \tau$; N – число эксплуатируемых объектов за тот же период; $\Delta \tau$ – время (срок эксплуатации объекта).

Для исследования сложных неоднородных систем используются логико-вероятностные методы. При этом структура сложной системы описывается методами математической логики, а количественная оценка надежности и безопасности – методами теории вероятностей и математической статистики. Теоретические исследования этих методов изложены в работах В.И. Рябина [95] и В.А. Острейковского [65]. Для редких и чрезвычайных событий, к которым можно отнести аварии в СЭ Севера, для анализа риска всей системы можно использовать метод графоаналитического исследования структуры причинно-следственных связей факторов, приводящих к аварии.

Метод представляет собой анализ системы для выявления возможного хода развития событий и определения последствий. Условно такой метод называется сценарным подходом, поскольку итогом рассмотрения процесса в этом случае является построение цепочек событий, связанных причинно-следственными связями, для каждой из которых определена соответствующая вероятность. В начале цепи стоит группа исходных событий, называемых причинами, в конце – группа событий, называемых последствиями.

Среди структурных методов оценки вероятности отказов наиболее разработанными являются следующие [24, 118]:

- метод построения деревьев событий;
- метод деревьев отказов;
- метод «события - последствия».

Основу методов составляют логико-вероятностных схемы. Для анализа техническую систему обычно разбивают на функциональные части, анализируют их работу и характеристики. Логическим обоснованием такого метода является соображение, что многие системы (и особенно здания) представляют в значительной степени новые комбинации известных частей. Поэтому для расчетов надежности системы необходим структурный анализ конструктивной системы, целью которого является выявление элементов и взаимосвязей, влияющих на надежность системы.

В системной теории надежности принимают положение о том, что элементы взаимодействуют между собой по некоторым логическим схемам. Для наглядного представления взаимодействия элементов используются структурные схемы или графы. Суть структурного анализа надежности технической системы заключается в последовательном рассмотрении всех случайных событий, определяющих функционирование системы - отказов и восстановлений работоспособности ее элементов, с учетом типа их соединения с точки зрения надежности. Более подробно рассмотрим основные положения методов «дерево событий», «дерево отказов» и анализа технологической связанности.

Метод дерева событий [9, 65, 72, 75] обладает большими возможностями для решения задачи вероятностного анализа безопасности объектов энергетики, нацелен на выявление путей развития аварии, а также на определение количественных показателей, характеризующих вероятность и последствия аварии. Использование данного метода позволяет найти приемлемый по безопасности вариант СЭ путем последовательного перебора развития возможных аварий. За начальную точку дерева событий берется исходное событие и в зависимости от состояния элементов, влияющих на протекание АС, осуществляется логический перебор различных путей развития аварии (ветвей дерева событий) и ее последствий. Если события (отказ, неисправность) независимы, то вероятность реализации данной последовательности равна произведению вероятностей отдельных событий этой последовательности.

Построение и анализ дерева событий для объектов энергетики позволяют определить возможные пути развития аварии, последствия аварии и вероятность их реализации. Варьируя вид технологической схемы объектов энергетики и характеристики используемых элементов, с помощью метода дерева событий можно определить варианты СЭ, удовлетворяющие требованиям по безопасности. Обоснование возможности применения метода событий для системы теплоснабжения проведено в работе Л.С. Попырина [72].

Для анализа надежности СЭ очень часто используется метод «дерева отказов». Оценку надежности объекта начинают с предварительного анализа опасностей, которые затем применяют при построении дерева отказов. Анализ проводится на основе изучения процесса работы и эксплуатации системы, детального рассмотрения воздействий окружающей среды, существующих данных по отказам аналогичных сооружений. Прежде всего, определяют вид отказа системы. Затем выявляют элементы системы, которые могут вызвать опасность. При этом отвечают на вопрос, что будет с системой, если произойдет отказ такого-то элемента. Чтобы получить количественную оценку надежности с помощью дерева отказов, надо располагать данными об исходных отказах. Эти данные могут быть получены на основе опыта эксплуатации оборудования, экспериментов и экспертных оценок специалистов.

Дерево отказов позволяет выявлять риски, присущие системе, и количественно их описать [90], выявить все пути, которые приводят к основному событию, и, что наиболее важно, дает возможность определить комбинации событий, которые могут вызвать определяющее событие. Процессы в производстве или технические объекты могут иметь несколько разных технологических цепочек, и все они должны быть отражены в графах дерева отказов. Главное событие может индуцироваться большим числом исходных событий. Если можно выделить минимальное число цепочек событий, которые приведут к главному событию, то можно определить ключевые части системы или процессы, изменения которых могут быть наиболее существенны с точки зрения безопасности. Минимальное число цепочек событий, при которых может произой-

ти главное событие, называется «набор минимальных кратчайших путей» (set of minimum cut sets), а кратчайший путь (cut set) - это группа событий или первичных источников отказов, которые могут привести к главному событию через минимальное число шагов.

Рассмотрим определение надежности на основе исследования конструктивных схем по отказам. Аварии обычно случаются тогда, когда отказ одного или нескольких элементов системы приводит к опасной ситуации. Установление отказа всей системы можно произвести методом проблемного упрощения путем построения логического дерева отказов. Дерево отказов графически представляет взаимосвязь между исходными отказами элементов системы и событиями, приводящими к возникновению различных АС, и присоединенными логическими знаками «и» и «или». Исходными отказами являются события, для которых имеются данные о вероятности их осуществления. Обычно это такие отказы элементов системы как разрушения конструкций и узлов соединения конструкций, различные иницирующие события (ошибки персонала при эксплуатации, случайные повреждения и т.д.). Логический знак может иметь одно или несколько входных событий и только одно выходное событие. Выходное событие логического знака «и» наступает в том случае, если входные события появляются одновременно. Выходное событие логического знака «или» наступает, если имеет место любое из входных событий.

Одним из часто применяемых методов для оценки надежности сложных систем является учет функциональной взаимосвязанности частей [7]. Под функциональным элементом следует понимать часть системы, которая влияет на надежность всей системы. Главная задача состоит в выявлении взаимосвязи и степени влияния частей системы на надежность всей системы. Надежность системы зависит также от вида соединения элементов. Пусть элементы взаимодействуют так, что отказ любого из них приводит к отказу всей системы. Такое соединение называют последовательным. При последовательном соединении отказ системы определяется отказом слабейшего звена (элемента). Безотказная работа системы это случайное событие, равное пересечению независимых событий – безотказной ра-

боты каждого из элементов. Вероятность безотказной работы системы P получается по теореме умножения для независимых событий [7, 69]:

$$P = \prod_{k=1}^n P_k, \quad (2.8)$$

где n – количество элементов; P_k – вероятность безотказной работы элемента k .

Формула показывает, что, если элементы системы взаимодействуют по схеме последовательного соединения, то показатели надежности системы ниже соответствующих показателей любого из ее элементов.

Один из способов повышения надежности объектов – введение в систему избыточных элементов или подсистем. Для простой схемы резервирования при параллельном соединении n элементов вероятность отказа системы Q равна произведению вероятностей Q_1, \dots, Q_n отказов ее элементов:

$$P = 1 - \prod_{k=1}^n (Q_k) = 1 - \prod_{k=1}^n (1 - P_k), \quad (2.9)$$

где n – количество элементов; P_k – вероятность безотказной работы элемента k .

В заключении следует отметить, что наиболее разработанными и применяемыми методами исследования надежности СТС являются структурные методы анализа на основе построения логико-вероятностных схем объектов. Рассмотренные методы исследования надежности СТС можно применить для СЭ. Обоснование возможности применения логико-вероятностных методов для исследования систем теплоснабжения проведено в работе Л.С. Попырина [72].

1.5. Постановка задач исследования надежности децентрализованных энергетических систем

Обеспечение устойчивого энергоснабжения населенных пунктов северных территорий страны направлено на повышение качества жизни населения, проживающего в сложных климатических условиях. Основная часть населенных пунктов находится в зоне децентрализованного энергоснабжения. Неразвитость инфраструктуры, сложная схема завоза топлива, изолированность поселений не поз-

воляют организовать рациональное энергообеспечение потребителей. Современная ситуация в сфере энергоснабжения характеризуется серьезными проблемами, состоящими в изношенности оборудования, низкой эффективности и надежности, неудовлетворительном уровне комфорта в зданиях; низком техническом уровне и низкой экономической эффективности систем.

Как все технические системы, энергообъекты во времени изнашиваются, появляются отказы, снижающие качество энергообеспечения. Примеры крупных аварий со значительными материальными и социальными ущербами, которые произошли в последние десятилетия в системах энергоснабжения ряда населенных пунктов РС(Я), свидетельствуют о том, что эта проблема сохраняет особую актуальность. Авария в одном объекте может сопровождаться каскадным развитием, приводящим к массовому нарушению подачи энергии потребителям.

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. Однако, используемые в настоящее время методы оценки надежности отдельных элементов и системы в целом не позволяют в полной мере оценить их надежность и безопасность.

Цель работы заключается в повышении надежности децентрализованных систем энергоснабжения северных территорий. Для достижения указанной цели в работе поставлены следующие задачи: Выбор и обоснование показателей эффективности функционирования энергетических систем и комплексов северных территорий; Разработка методики расчета вероятности неблагоприятных событий децентрализованной ЭС; Выбор показателей тяжести отказов на основе статистического анализа аварий ЭС в условиях Крайнего Севера; Оценка ущербов при отказах децентрализованных ЭС; Развитие методов оценки надежности и безопасности децентрализованных систем энергоснабжения.

Глава 2. Системный анализ показателей безопасности энергетики в условиях Севера

2.1 Анализ системных свойств энергетики Севера

Проблема безопасности человека и среды его обитания при возникновении природных и техногенных аварий и катастроф недостаточно разработана. Исследование безопасности функционирования энергоснабжения на Севере проводится на основе системного анализа [5].

Научные основы системного подхода к исследованию в энергетике, связанные с анализом их свойств, разработкой методов управления их функционированием развиты в работах Л.С. Беляева, Н.И. Воропая, В.А. Кулагина, Л.А. Мелентьева, А.Л. Мызина, Ю.Н. Руденко, И.А. Ушакова, В.А. Савельева, Б.Г. Санеева, Б.В. Папкина, Л.С. Попырина, Е.В. Сенновой, В.А. Стенникова и других [7, 8, 48, 53, 54, 66, 71, 72, 73, 92, 98, 99, 100, 102]. Теоретические исследования по методам оценки надежности и безопасности изложены в работах В.А. Акимова, Н.А. Махутова, С.А.Тимашева, В.В. Лесных, В.А. Острейковского, И.А. Рябикина, А.Ф. Бермана, А.С. Можяева, С.М. Сендерова, В.Г. Китушина, Э.Дж. Хэнли, Х. Кумамото и других [42, 47, 65, 95, 110, 117]. Вопросы безопасности, надежности и эффективности СТС, эксплуатируемых в условиях Крайнего Севера, рассматривались в работах В.П. Ларионова, Н.А. Махутова, В.В. Москвичева, Н.А. Петрова, А.П. Кылатчанова, В.Р. Киушкиной, И.Д. Эляковой, Л.В. Старостиной и других [22, 36, 37, 39, 40, 41, 44, 46, 47, 51, 119].

Системные исследования в энергетике связаны с анализом свойств ЭС, разработкой методов управления их функционированием. Системы энергоснабжения представляют собой структурно сложные, неоднородные технические системы, элементы которых взаимосвязаны и взаимозависимы в технологическом процессе их функционирования. Внутренние и внешние возмущения, возникающие в некоторых элементах или подсистемах, изменяют свойства СЭ. Результаты и достоверность анализа этих свойств зависят от исходной информации об их функционировании. При этом отмечается, что неполнота, неопределенность информации о

состоянии и процессах функционирования систем является объективным свойством СЭ [7, 75, 76].

Назначение системы энергоснабжения в условиях Севера состоит в бесперебойном обеспечении потребителей необходимым количеством электро- и теплоэнергии [40, 68]. Система энергоснабжения состоит из множества элементов, каждый из которых выполняет свои определенные функции, и все вместе предназначены для выполнения основной цели. Потребность в электро- и теплоэнергии в условиях Севера значительно выше, чем в других зонах. Например, здания в г. Якутске отапливаются 235 дней в году, а потребление электроэнергии из-за укороченного светового дня происходит в повышенных объемах. В арктической зоне эти показатели еще выше. Также СЭ характеризуется рассредоточенностью и множеством потребителей (таблица 1), возможностью катастрофических последствий аварий, особенно в экстремальных условиях эксплуатации (рисунки 1-2).

Система энергоснабжения на Крайнем Севере состоит из систем электро-снабжения и теплоснабжения. Каждая система в свою очередь состоит из подсистем, выполняющих свои определенные функции. Технической особенностью системы является взаимосвязанность всех элементов между собой. Структурную схему функциональной взаимосвязи элементов системы энергоснабжения можно представить в следующем виде (рисунок 4). Основными элементами системы электроснабжения являются система топливоснабжения, система генерации электроэнергии и система транспортировки электроэнергии, а теплоснабжения – система водоснабжения, теплоисточники, система топливоснабжения, система выработки тепла и система транспортировки тепла. Все эти системы эксплуатируются в суровых климатических условиях, состоят из больших подсистем, их отказы вызывают значительные экономические потери для социальной среды (таблица 4).

Свойства СТС проанализированы в работах [1, 7, 24, 26, 27, 47, 51, 53, 95, 110]. Результаты исследований по СЭ приведены в работах [53, 54, 70, 73, 75, 78]. Основными свойствами ЭС являются эффективность, безопасность, живучесть и надежность. В работах [26, 27, 70] анализируются соотношения свойств «живуче-

честь», «надежность», «безопасность» и «эффективность». Ниже представлен анализ системных свойств СЭ применительно к децентрализованным объектам.



Рисунок 4 - Функциональная схема системы энергоснабжения

Базовым свойством всех сложных технических систем (СТС) является эффективность. Эффективность является общим комплексным свойством любого производства, зависит не только от параметров технической системы, но и практически от всех факторов, включая экономические, финансовые и социальные. Для суровых климатических условий Севера эффективность в энергетике представляет собой способность постоянного поддержания оптимального энергоснабжения потребителей с минимальными затратами ресурсов и времени.

Надежность является определяющим свойством технического состояния объекта [15, 17, 52, 54]. Теория надежности предназначена для выбора оптимальных технических решений, связанных с необходимостью сохранения основных характеристик изделий и их элементов в течение требуемого промежутка времени в определенных условиях эксплуатации. Общие положения, основные понятия и термины надежности регламентированы ГОСТ 27.002-89, в соответствии с которым под надежностью понимается «свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования». Это свойство является комплексным и в зависимости от назначения объекта и условий

его применения включает в себя безотказность, долговечность, ремонтпригодность и сохраняемость объекта в целом и его составных частей. Отказ в теории надежности трактуют как случайное событие.

Одним из системных показателей надежности является вероятность безотказной работы в течение определенного времени $P(t)$ [7, 52, 54]. В своде правил по тепловым сетям (СП 124.13330.2012) вероятность безотказной работы принимается как основной показатель надежности и приводятся критериальные значения. Данный показатель служит одним из основных при расчетах надежности. В предположении, что эксплуатация объекта происходит непрерывно, продолжительность эксплуатации выражена в единицах времени t и эксплуатация начата в момент времени $t = 0$, за вероятность безотказной работы объекта $P(t)$ на отрезке времени $[0, t]$ принимается:

$$P(t) = P(\tau > t), \quad (2.1)$$

где τ - наработка от начального момента до возникновения отказа.

Вероятность безотказной работы по статистическим данным об отказах оценивается выражением:

$$\overline{P(t)} = \frac{N_0 - n(t)}{N_0}, \quad (2.2)$$

где N_0 — число элементов в начале работы (испытаний); $n(t)$ — число отказавших элементов за время t ; $\overline{P(t)}$ — статистическая оценка вероятности безотказной работы.

При большом числе элементов (изделий) N_0 статистическая оценка $\overline{P(t)}$ практически совпадает с вероятностью безотказной работы $P(t)$. Статистическую оценку вероятности безотказной работы $\overline{P(t)}$ можно получить, обработав результаты испытаний на надежность достаточно больших выборок.

Применительно к системе энергетики проблема надежности обсуждена в работах [26, 34, 38, 53, 54, 55, 63, 70, 71, 73, 75, 76, 77, 93, 99, 100]. Надежность СЭ трактуется как свойство СЭ осуществлять в реальных условиях бесперебойное снабжение потребителей соответствующими видами энергии допустимого каче-

ства и по согласованным объемам поставок, не допуская возникновения ситуаций, опасность которых для людей и окружающей среды превышает определенную величину.

Отказы СЭ связаны с недостаточным уровнем надежности элементов энергетического оборудования. Переход подсистем энергоснабжения в нерабочее состояние происходит по многим причинам, при этом возникновение отказа или повреждения в инженерных системах является случайным событием. При описаниях аварий в системах энергоснабжения на Севере (раздел 1.2) приведены следующие первопричины аварий: выход из строя датчика контроля пламени, неисправность автоматики горелки, неисправность фотореле, трещина в обшивке газохода и др. Такие аварии сопровождаются пожарами, загрязнением окружающей среды и потенциально опасны для обслуживающего персонала и населения.

Одним из основных свойств ЭС является живучесть [3, 51, 56, 78]. Содержание, вкладываемое в понятие «живучесть» в отечественной технической литературе, еще не вполне установилось [54, 70, 73, 78]. В [7] живучесть определяется как «свойство объекта противостоять локальным возмущениям и отказам, не допуская их лавинного развития». Для СЭ предлагается более расширенное определение живучести как свойство систем [73], «состоящее в его способности противостоять развитию критических отказов из дефектов и повреждений при установленной системе технического обслуживания и ремонта, или свойство системы сохранять ограниченную работоспособность при воздействиях, не предусмотренных условиями эксплуатации, или свойство системы сохранять ограниченную работоспособность при наличии дефектов или повреждений определенного вида, а также при отказе некоторых компонентов».

Основной причиной возможного нарушения живучести СЭ являются внешние неблагоприятные действия, не предусмотренные штатными ситуациями на стадии проектирования и нормативными требованиями при эксплуатации систем. К числу внешних неблагоприятных воздействий относятся стихийные бедствия (землетрясение, наводнение и др.), длительные экстремально низкие значения температуры наружного воздуха, прекращение подачи топлива или воды к источ-

нику теплоты. Внешние неблагоприятные воздействия трудно предсказуемы по месту, времени возникновения и по силе воздействия. Также для СЭ характерными причинами являются возмущения внутреннего происхождения. В случае неблагоприятного воздействия одного или нескольких факторов происходит развитие АС системы энергоснабжения, причем зачастую наблюдается синергетический эффект [53, 72, 74, 100]. В том случае, когда уровень живучести системы низкий и не удастся вовремя ввести резервы, авария принимает глобальный характер, распространяется на другие подсистемы. Развивается так называемый каскадный процесс, приводящий к массовому нарушению подачи энергии потребителям.

Применительно к свойствам надежности и живучести в Своде Правил «Тепловые сети СП 124.13330.2012» способность действующих систем централизованного теплоснабжения рекомендуется определять по трем показателям: вероятностью безотказной работы ($P > 0.86$), коэффициенту готовности ($K_r > 0.97$), живучестью. В пункте 6.35 Свода Правил рекомендуется держать температуры воды в теплопроводе не ниже 3°C для обеспечения живучести системы теплоснабжения [97].

Следующим важным свойством СТС является безопасность, которая показывает отношение СТС к социальной и природной системам. Согласно [7] безопасность определяется как «свойство объекта не допускать ситуаций, опасных для людей и окружающей среды». Более расширенное определение дано в ГОСТ 27.002-89, где под безопасностью понимается «свойство объекта при изготовлении, эксплуатации и в случае нарушения работоспособного состояния не создавать угрозу для жизни и здоровья людей, а также для окружающей среды». СТС испытывают воздействия, вызываемые природной средой (сейсмические, ветровые и температурные воздействия, мерзлотно-осадочные явления и т.д.). Таким образом, сложные технические объекты, как экологически -, взрыво- и пожароопасные объекты, негативно влияют на природную и социально-экономическую среды, а также испытывают обратные воздействия. Безопасность СТС характеризует стойкость социальной и природной системы против возможных воздействий

со стороны СТС, т.е. причина генерируется в самой СТС, следствия же проявляются в окружающей системе [45, 48].

Проблемы энергетической безопасности рассмотрены в работах Н.И. Воропая [12, 53, 100], В.В. Лесных [42], Л.С. Попырина [72, 74], Е.В. Сенновой [98, 99], А.Л. Мызина [66], Б.В. Папкина [70, 71], В.А. Савельева [96] и других исследователей. Безопасность объектов энергетики (ОЭ) характеризует бесперебойное снабжение потребителей энергией требуемого качества и недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды. Безопасность ЭС определяет уровень защищенности потребителей от АС в этой системе. Безопасность СЭ может быть расстроена под влиянием как внешних, так и внутренних возмущений. К внешним возмущениям относятся природные и социально-экономические воздействия, к внутренним - технические, технологические, организационные и индивидуально-психологические источники потенциальных опасностей, присущие системам энергоснабжения. Природные воздействия – это экстремально низкие или высокие температуры, большие суточные перепады температур, значительное количество осадков, наводнения, порывы ветра, грозовые разряды и др. Такого рода опасности не всегда удастся прогнозировать с достаточной степенью точности. Социально-экономические воздействия складываются из текущего экономического состояния объекта и региона в целом, законодательного регулирования функционированием предприятий, эффективностью системы промышленной безопасности на предприятии. Технические воздействия – это качество проектирования, выбор того или иного уровня надежности. Технологические воздействия связаны с устойчивостью и живучестью системы теплоснабжения. Если живучесть системы недостаточна, то может развиваться катастрофическая авария с полным выходом части подсистем из строя, охватывающая большое количество потребителей. Организационные воздействия определяются управлением технологическим процессом, регламентацией требований безопасности. Источником индивидуально-психологических воздействий являются кадровый менеджмент (подбор и расстановка кадров, оценка мотивации поведения персонала и т.д.), принятие в нестандартной ситуации неоптимального решения, нарушение трудовой и производ-

ственной дисциплины, нарушение правил безопасной эксплуатации и др. При эксплуатации системы энергоснабжения населенных пунктов используют экологически-, взрыво- и пожароопасные вещества, которые являются потенциальными источниками возникновения АС. Из-за большого количества деревянных зданий сохраняется сложная обстановка по пожарной безопасности.

В настоящее время неблагоприятное воздействие ОЭ на людей и окружающую среду при их сооружении и функционировании достигли таких масштабов, что заставляют рассматривать проблему безопасности ОЭ как чрезвычайно значимую [42, 48, 72]. Крупные аварии со значительным материальным и социальным ущербом, которые произошли в последние десятилетия в системах энергоснабжения ряда населенных пунктов РС(Я), свидетельствуют о том, что эта проблема сохраняет особую актуальность [5, 31, 82, 119].

Ранее технические системы проектировались из условия обеспечения их надежности. При этом СТС проектировались на базе концепции полного исключения аварий. Этот принцип на практике не подтвердился, отказы в виде аварии не были полностью исключены даже на ответственных объектах. Практика эксплуатации СТС показала, что, даже для системы, спроектированной с высокой степенью ответственности, состоящей из множества элементов и подвергающейся различным воздействиям, нет возможности предусмотреть все факторы, в особенности эксплуатационные, учитывающие переход на новые непроектные состояния [1, 4, 44, 51].

Определения свойств технических объектов приведены в нормативных документах (таблица 5). Определение свойства «надежность» по ГОСТ является универсальным для всех объектов, где различие устанавливается функцией системного объекта. Два определения надежности СЭ отличаются тем, что одно определяет свойство СЭ, а второе характеризует функционирование. Функционирование СЭ рассматривается как процесс реализации ее способности снабжать потребителя продукцией. В определении «надежность функционирования СЭ» добавлено определение понятия «безопасность» из ГОСТ. Следует отметить тесную взаимосвязь свойства безопасности СЭ со свойствами надежности и живуче-

сти, нарушение которых может привести к нарушению ее безопасности [70]. Примеры различных аварий показывают, что безопасность населения и технических объектов в Якутии в зимнее время в основном определяется надежностью элементов системы энергоснабжения. Предметом надежности считаются существенные системные связи и причинно-следственные взаимодействия, не выходящие за пределы СТС, а предметом живучести и безопасности – существенные причинно-следственные взаимодействия среды с системой, причем в случае живучести причина генерируется окружающей средой, а следствия проявляются в СТС. В случае безопасности причина генерируется самой СТС, следствия же проявляются в окружающей среде [44]. Если надежность со своими подчиненными свойствами относится к стадии технического проектирования, то безопасность характеризует эксплуатационные свойства СТС. Цель повышения живучести состоит в обеспечении управления их функционированием, позволяющего эффективно преодолеть влияние возникающих внешних и внутренних возмущений. Надежность и живучесть характеризуют состояние элементов энергетической системы, но не раскрывают качество функционирования всей системы и являются составными частями безопасности. Для оценки живучести системы в основном используются показатели такие же, как и при надежности.

Таблица 5 – Терминология основных свойств СЭ

Термин	Определение	Источник
Надежность	Свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.	ГОСТ 27.002-89.
Безопасность	Свойство объекта не допускать ситуации опасные для людей и окружающей среды.	Надежность систем энергетики. Терминология / Под ред. Ю.Н. Руденко
Надежность функционирования СЭ	Свойство СЭ осуществлять в реально складывающихся условиях бесперебойное снабжение потребителей соответствующими энергоносителями согласованного качества и по согласованным графикам (объемам) поставок, не допуская возникновения ситуаций, опасность которых для людей и окружающей среды превышает определенную величину.	Надежность систем энергетики: достижения, проблемы, перспективы/ Г.Ф. Ковалев, Е.В. Сеннова и др.

Применительно к системе энергоснабжения Севера, свойство надежности, как приведено в определении, «не допуская возникновения ситуаций, опасность которых для людей и окружающей среды», не может обеспечить и в полной мере характеризовать качество функционирования данной системы. Как показано на рисунке 2 число крупных аварий возрастает при понижении температуры среды, ущерб от таких аварий очень высокий, примеры аварий приведены в таблице 4. При эксплуатации СЭ при положительных температурах эти явления отсутствуют. При этом эксплуатационное состояние объектов описывается свойством надёжности. Для системы энергоснабжения в условиях Севера расчеты надежности отдельных элементов системы не позволяют обосновать безопасность системы в целом. То есть в условиях Севера свойство надежности не характеризует в полном объеме качество функционирования объекта. При одинаковой надежности систем в условиях Севера ущерб может быть на несколько порядков выше, чем для систем центральных регионов. Из чего следует, что определяющим свойством ЭС должна приниматься безопасность, учитывающая взаимодействие технической системы и окружающей системы, и характеризующая качество системы на стадии эксплуатации.

Обеспечение безопасности включает решение проблем надежности и живучести системы. Предметом исследования является процесс возникновения возмущений, реакция системы энергетики на возникшие возмущения, последствия для потребителей энергии и способ устранения или компенсации нежелательных последствий.

2.2 Выбор показателей безопасности систем энергоснабжения

Если безопасность объекта характеризуется значениями некоторых параметров, то признаком возникновения отказа по безопасности является выход любого из этих параметров за установленные пределы. В общем случае для оценки безопасности применяются общие и частные показатели. Вероятностные показатели учитывают случайный характер многих возмущений, а также различных

условий функционирования систем энергоснабжения и их взаимодействия с окружающей средой. Одним из важнейших этапов решения рассматриваемой проблемы является выбор критерия безопасности, т.е. определение признака или условий, в соответствии с которыми принимается решение относительно безопасности систем энергоснабжения, особенно в условиях Крайнего Севера. Должен быть выбран и установлен такой нормативный уровень показателей безопасности объекта, превышение которого является недопустимым. Анализ имеющихся нормативно-технических документов по безопасности показал, что они далеко не совершенны [72].

Для СЭ Севера безопасность обуславливается обеспечением тепловой энергией потребителей. На Крайнем Севере при продолжительных отрицательных температурах потребность в тепле является жизнеобеспечивающим фактором. В качестве частного критерия безопасности системы теплоснабжения принимается условие недопустимости уменьшения температуры воздуха в отапливаемых помещениях ниже критической [30, 72, 77]:

$$t \geq t_{к2}. \quad (2.3)$$

Температурные условия устанавливают границы нормального и пониженного уровня функционирования систем теплоснабжения, характеризуют выходные параметры системы, но не отражают внутренних причин снижения безопасности СЭ.

В общем случае для оценки безопасности эксплуатации северных СЭ необходимо обосновать соответствующие показатели, которые должны отражать эффективность их функционирования и быть некоторой мерой, количественно оценивающей качество выполнения функции. В отношении СТС в последние десятилетия активно применяется показатель в виде риска [1, 33, 44 и др.].

Отечественный и зарубежный опыт в сфере обеспечения промышленной безопасности показывает, что решение проблемы предупреждения АС требует значительных-материальных затрат, которые по мере повышения уровня безопасности имеют тенденцию к беспрецедентному росту [44]. В условиях ограниченности ресурсов важное значение имеет задача оценки эффективности и оптимально-

сти их распределения для снижения опасности. Процедуры управления риском должны ослабить или исключить вредное воздействие разрушительных природных факторов. В системе управления безопасностью осуществлен переход от принципа абсолютной безопасности к принципу допустимого риска или приемлемого риска [47].

Понятие "риск" используется для качественной оценки события, и может характеризовать их количественно [33, 65], в рамках двух подходов:

1. Риск – как вероятность наступления нежелательного события;
2. Риск как прогнозируемый ущерб.

В первом случае риск характеризует безопасность таких технических систем как автомобильный, водный, воздушный транспорт, где последствия аварий сопровождается гибелью людей. В данной ситуации критерий безопасности определяется условием, когда вероятностный риск меньше критического допустимого значения:

$$R < R_d. \quad (2.4)$$

Вопросы установления приемлемого уровня индивидуального риска обсуждены в работах [115, 117]. Пороговая величина риска 10^{-6} легла в основу стандартов безопасности некоторых стран, а также отечественных ГОСТов по безопасности персонала и населения (например, ГОСТ 12.1.010-76 по взрывобезопасности и др.). Очевидно, что уровень приемлемого (допустимого) индивидуального риска должен устанавливаться законодательным актом и зависит от экономического состояния страны. В некоторых промышленно развитых странах он принимается уже равным 10^{-7} и 10^{-8} (для АЭС).

Вероятностный показатель риска в случае энергосистемы может быть использован для оценки безопасности отдельных подсистем (рисунок 4) и не может полностью оценить безопасность систем энергоснабжения в условиях Севера, где последствия в большей степени определяются социальными потерями.

Во втором случае анализ риска проводится для установления последствий отказов, с детальным расчетом возможных различных потерь и ущербов [1, 33].

Величина риска в форме прогнозируемого ущерба определяется как произведение величины события на меру возможности его наступления:

$$R = Q_f \cdot Y, \quad (2.5)$$

где Q_f – вероятность отказа; Y – ущерб от отказа.

Обобщающим показателем, отражающим уровень безопасности объектов при эксплуатации и учитывающим связи с окружающей средой, является ущерб, который зависит от интенсивности отказов системы и характеризует эффективность функционирования системы в целом. В зависимости от решаемых задач техногенный или природный риски могут выражаться математическим ожиданием ущерба за год или вероятностью нанесения определенного ущерба объекту, территории, окружающей среде (экономический и экологический риски). В последнем случае показатель риска может представлять собой произведение вероятностей, например, вероятности аварии на вероятность формирования различного уровня поражающих факторов и на вероятность последствий от их воздействия (ущерба, степени разрушения и т.д.). Произведение интенсивности аварий (или вероятности аварии) на ущерб позволяет оценить риск в денежных или натуральных единицах, что является важным для СЭ в условиях Севера. В этом случае появляется возможность экономического подхода при выборе мероприятий, направленных на обеспечение эффективного уровня безопасности. Стоимостные показатели позволяют использовать оптимизационный подход к принятию решений с одновременным учетом различных факторов. Сравнительное определение показателей свойств технических систем приведено в таблице 6.

Таблица 6 – Характеристика показателей и критерии функционирования СЭ

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

Проблема безопасности энергетики в настоящее время в основном рассматривается на уровне больших ЭС на территориальном уровне страны и регионов. Безопасность энергетической системы является определяющим для объектов атомной и гидротехнической энергетики [46]. На уровне населенных пунктов качество функционирования объектов энергетики определяется, как правило, их надежностью [73] с оценкой фактического и косвенного ущерба от недоотпуска энергии [91]. Можно констатировать, что ущерб от аварий объектов энергетики для малых населенных пунктов в центральных районах страны намного меньше, чем при авариях в условиях Севера. Даже при высокой надежности, низкой вероятности отказов в северных регионах имеет место большой уровень риска. Нужно отметить принципиальное отличие оценки риска аварий СЭ населённых пунктов северных территорий – при низких температурах эксплуатации оценка риска возможна только через прогнозируемый ущерб.

Расчет риска при этом сводится к определению вероятности наступления тех или иных нежелательных событий, выбору достаточно адекватной модели возникновения ущербов и их ценовому выражению. Но применение такого подхода для практической оценки риска не всегда возможно. Отсутствие прямого денежного эквивалента человеческой жизни не позволяет представить в сопоставимом виде все возможные ущербы. В таких случаях для оценки риска используют упрощенные подходы, сводя риск к вероятности неблагоприятного события. Практически апробированные методики количественной оценки рисков различных видов человеческой деятельности, как и рисков различных опасных природных явлений, в настоящее время отсутствуют. Это относится и к процедуре оценки вероятности возникновения опасного события, и к процедуре оценки величины ущерба. Поэтому полученные оценки неизбежно носят укрупненный, оценочный характер.

В таких случаях представляется возможным получить приемлемое значение риска из условия сбалансированности двух видов затрат: на мероприятия по снижению риска и на возмещение возможного ущерба при данном уровне риска (или

возможную потерю доходности), т.е. минимизируя сумму этих затрат [34, 91, 92, 105]:

$$\sum Z_i \rightarrow \min. \quad (2.6)$$

Однако такой подход требует учета в денежном выражении цены человеческой жизни (для компенсации семьям погибших). Пока единой категории такой цены с позиций государства не установлено, хотя существуют методы расчета этого параметра, в том числе основанные на определении удельной величины национального дохода, создаваемого человеком за период его трудовой деятельности (до ухода на пенсию). В ряде промышленно развитых стран государством эта цена установлена.

Заключая, следует отметить, что оценка риска в форме прогнозируемого ущерба является интегральным показателем, отражающим уровень безопасности СЭ и учитывающим связи с внешним социальным контуром. В этом случае безопасность связывается со свойством эффективности системы. Риск как прогнозируемый ущерб можно применить для задачи оценки и прогнозирования безопасности СЭ, особенно в условиях Севера. Безопасность СЭ определяется условием приемлемого риска.

2.3. Показатели качества функционирования систем энергоснабжения

Снижение качества функционирования технического объекта определяется уровнем аварийности, возможностью возникновения АС и тяжестью отказов, может меняться в широком интервале и определяться различными показателями. Для установления этих показателей проводится классификация АС и используются коэффициенты тяжести отказов [80], которые определяются как отношение суммы общего ущерба к стоимости объекта. В данном варианте определения коэффициента тяжести отказа учитывается только потери, имеющие материальный характер. Также вводится комплексный показатель - коэффициент экономической ответственности [82]. Они могут быть использованы для более однородных технических систем. Качество функционирования СЭ в условиях Севера определяет-

ся множеством показателей. В настоящее время единая система показателей аварийности отсутствует, при этом используются такие показатели как процентное снижение электрической нагрузки, недоотпуск электроэнергии в процентах от общего потребления энергии, время восстановительного ремонта. Ниже приведено обоснование показателей функционирования СЭ с учетом их аварийности.

Разберем характерное описание аварии с ущербом. В п. Тополиное 29 декабря 1998 года из-за поломки глубинного насоса на водозаборе произошло замерзание водовода. В результате аварии без тепла остались 42 жилых дома, 34 объекта соцкультбыта и 5 административных зданий. Число пострадавших составило 1058 человек, в том числе 414 детей. Была проведена эвакуация населения в п. Хандыга. В этом случае, ущерб разделяется на конкретные материальную и социальную части. К материальной части ущерба относятся отказ насоса и водовода. К социальной части ущерба относится остановка подачи тепла для 1058 человек.

Таким образом, аварии энергетических систем Севера могут сопровождаться не только снижением отпуска электроэнергии и понижением температуры в жилых зданиях, но и вынужденной эвакуацией жителей в другие населенные пункты с обеспечением их содержания в период ликвидации последствий аварии. Аварии в системе энергоснабжения приводят к нарушению ее функционирования и снижению качества жизни потребителей.

В рамках поставленной задачи рассмотрим вопросы классификации АС. Согласно «Инструкции по расследованию и учету технологических нарушений в работе электростанций, сетей и энергосистем» [32] определены условия, относящие нежелательные события к авариям. К ним в отношении СЭ Севера можно отнести следующие пункты:

«2.1.7. Работа энергосистемы или ее части с частотой 49,2 Гц и ниже в течение одного часа и более или суммарной продолжительностью в течение суток более 3 часов.

2.1.8. Аварийное отключение потребителей суммарной мощностью более 500 МВт или 50% от общего потребления энергосистемой вследствие отключения генерирующих источников, линий электропередачи, разделения системы на части.

2.1.9. Повреждение магистрального трубопровода тепловой сети в период отопительного сезона, если это привело к перерыву теплоснабжения потребителей на срок 36 ч и более».

Показатели качества функционирования системы централизованного теплоснабжения рассмотрены в своде правил Тепловые сети «СП 124.13330.2012»: «Потребители теплоты по надежности теплоснабжения делятся на три категории: Первая категория – потребители, не допускающие перерывов в подаче расчетного количества теплоты и снижения температуры воздуха в помещениях ниже предусмотренных ГОСТ 30494 [14]. Например, больницы, родильные дома, детские дошкольные учреждения с круглосуточным пребыванием детей, картинные галереи, химические и специальные производства, шахты и т.п. Вторая категория – потребители, допускающие снижение температуры в отапливаемых помещениях на период ликвидации аварии, но не более 54 ч: жилые и общественные здания до 12°C; промышленные здания до 8°C. Третья категория – остальные потребители».

Из данной инструкции следует, что основными показателями АС приняты продолжительность остановки энергоснабжения и потеря суммарной мощности. Согласно классификации к авариям следует отнести события, когда при аварийном отключении потребителей потеря суммарной мощности составляет более 50% от общего потребления энергии или остановка энергоснабжения во времени составляет более трех часов в течение дня. К аварии также относится полное отключение теплоснабжения потребителей на срок 36 часов и более.

В своде правил допускается снижение температуры в здании до 12°C не более 54 часов. Также из положений свода правил можно сделать вывод, что если снижение величины подачи тепла будет ниже 90% при температуре наружного воздуха ниже 40°C, то состояние системы теплоснабжения относится к аварийному. Критериальной температурой нахождения людей в здании рекомендуется принять 12°C.

Приведенные данные относятся к централизованному энергоснабжению больших населенных пунктов. Установленное в инструкции время перерыва подачи тепла 36 часов и 54 часа относятся для населенных пунктов средней полосы страны. Для децентрализованной СЭ и для небольших населенных пунктов в

условиях Севера эти показатели могут быть меньшими, чем для населенных пунктов в центральной России. В условиях Севера для децентрализованных потребителей энергии при отсутствии централизованной аварийной службы замерзание объектов происходит в среднем не более чем за шесть часов. Время отключения потребителей от источника теплоэнергии может являться одним из показателей тяжести отказов, но оказывается недостаточным для характеристики снижения качества жизни населения при авариях.

В [39] проведено исследование времени остывания температуры воды в системе отопления. Время остывания здания зависит от его теплотехнических характеристик, температуры наружного воздуха, температуры в здании и теплоносителя. Продолжительность ремонтных работ при АС, когда полностью отключается система отопления, определяется соотношением:

$$\tau < T_{nm} \cdot \ln \frac{t_{вз} - t_n}{t_{от} - t_n}, \quad (2.7)$$

где T_{nm} - коэффициент аккумуляции здания; $t_{вз}$ - температура воздуха в здании; $t_{от}$ - температура теплоносителя в трубопроводах; t_n - наружная температура воздуха.

Расчетами получено, что температура внутреннего воздуха за 4 часа после отключения системы отопления понижается до 13°C. Жилые дома в населенных пунктах на Севере в основном построены из дерева, теплотехнические характеристики которых в основном не отвечают нормативным требованиям.

Системная статистика отказов различных СЭ в условиях Севера отсутствует. В связи с этим анализ статистических данных аварий технических объектов имеет важное значение. Ниже приведены данные анализа времени отключения при отказах систем электроснабжения, теплоснабжения и водоснабжения, выполненные по описаниям отказов за 2011-2013 гг. По статистическим данным можно провести классификацию состояния теплоснабжения при отказах. При определении аварии в системе энергоснабжения, приведенного в «инструкции по расследованию и учету технологических нарушений в работе электростанций, сетей и

энергосистем [32]», аварией считается состояние функционирования при котором СЭ не обеспечивает 50% от потребности (мощности). Также, при описании аварий применяются такие понятия как «теплоснабжение не нарушено», «частичное нарушение теплоснабжения», «полное отключение теплоснабжения». По описаниям аварий невозможно установить случаи, при которых система энергоснабжения не обеспечивает 50% от потребности в энергии. Согласно проведенного анализа, построена гистограмма по классам теплового режима в зданиях при отказе системы теплоснабжения. При классификации теплового режима в зданиях при отказах проведено деление всего массива на три группы: теплоснабжение не нарушено; частичное нарушение теплоснабжения; полное отключение теплоснабжения (рисунок 5). Событие «теплоснабжение не нарушено» можно не относить к отказу. К этой категории относятся случаи различных поломок оборудования, которые исправляются в ходе эксплуатации, а также случаи своевременного подключения резервных элементов, способствующих выполнению своей функции системы теплоснабжения. Можно предположить, что частота поломок должна быть значительно больше, но так как они устраняются своевременно, то в статистику отказов не попадают. Всего события, относящиеся к полному отключению теплоснабжения, составляют около 10%. Большая часть событий относится к частичному нарушению теплоснабжения, около 90% от всех аварийных отказов.

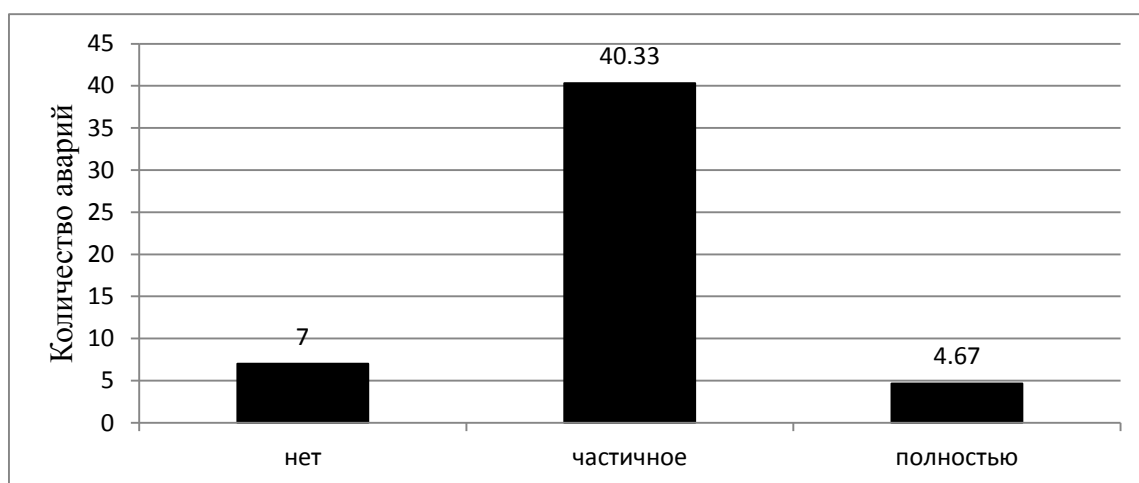


Рисунок 5 - Состояния теплового режима при отказе системы теплоснабжения (среднее за 2011-2013 гг.)

Важной характеристикой отказов в системе энергоснабжения является время восстановления. По описаниям аварийного состояния в системе энергоснабжения Севера выполнена статистика количества отказов по времени восстановления системы теплоснабжения (рисунки 6-7), системы электроснабжения (рисунки 8-9) и системы водоснабжения (рисунки 10-11). Рассмотрены два варианта принятия интервала распределения времени восстановления отказов рассмотренных технических систем. Количество отказов системы теплоснабжения интенсивно снижается во времени восстановления. Для первых двух систем в первые три часа восстанавливаются до 30% от всех отказов, за 6 часов восстанавливается половина всех отказавших систем. За сутки восстанавливается 80-90% от всех отказов, а за трое суток – около 90% отказов. Можно принять, что при отказах события «тепловой режим не нарушается» или «имеет место частичное снижение температуры в зданиях» в сумме занимают 90-95% от всех отказов. 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. Сравнение распределений времени восстановления после отказа показывает, что наибольшее число отказов происходит из-за нарушений в системе электроснабжения. Однако их большая часть (около 80%) восстанавливается в течение первых суток. Происшествия, не сопровождающиеся снижением качества предоставленных услуг, не относятся к авариям. Они могут иметь место в случаях, когда при своевременном обнаружении отказа оборудования происходит его ремонт или замена отказавшего элемента. Продолжительность этих происшествий ограничивается тремя часами. В противном случае отказы относятся к авариям, согласно [32]. В системе теплоснабжения за 6 часов восстанавливается примерно половина отказавших систем, за сутки – 75 %. Время восстановления за сутки примерно соответствует частичной потере качества теплоснабжения. Если время восстановления превышает одни сутки, то отказ приводит к полной потере теплоснабжения. В общем потоке отказов события «тепловой режим не нарушается» или «имеет место частичное снижение температуры в зданиях» в сумме занимают 90 % от всех отказов. Время восстановление более трех

суток занимает около 5-10% отказов и соответствует полной потере работоспособности всей системы, так как вызывают в основном продолжительные прекращения подачи энергии.

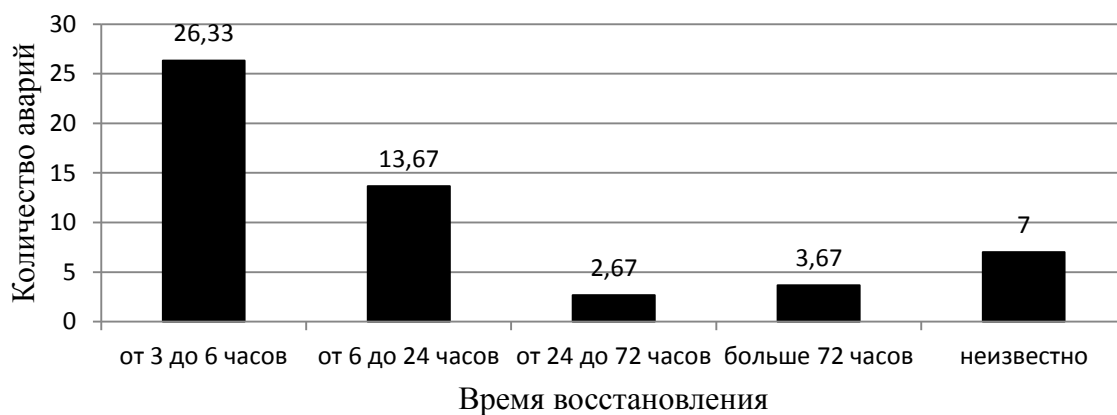


Рисунок 6 - Время восстановления при отказе системы теплоснабжения (среднее за 2011-2013 гг.), частое разделение интервалов времени

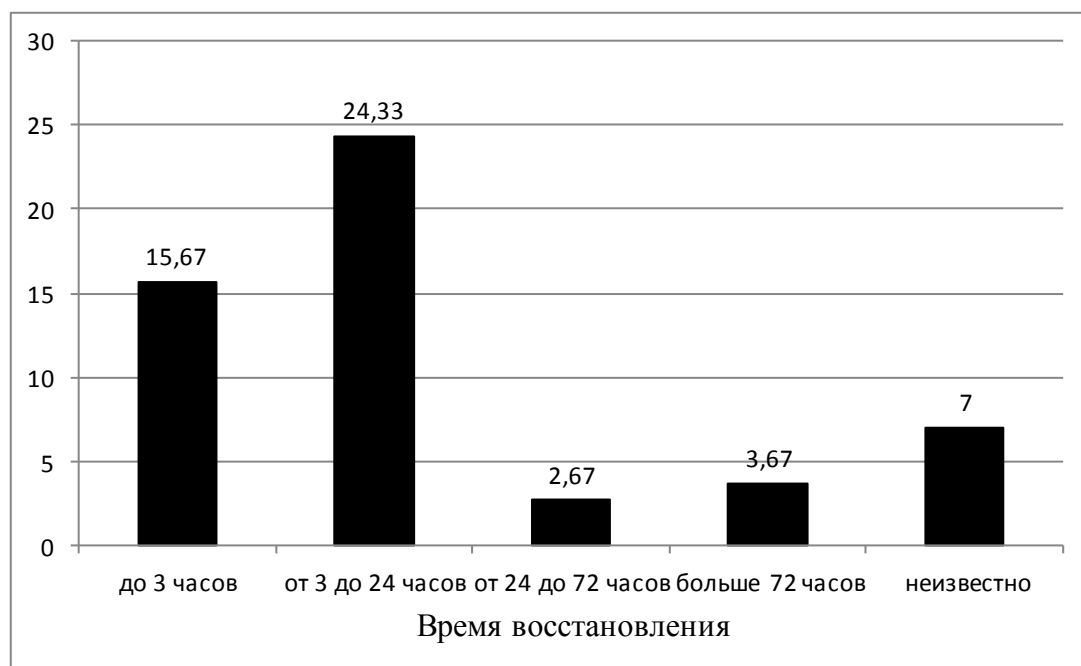


Рисунок 7 - Время восстановления при отказе системы теплоснабжения (среднее за 2011-2013 гг.), суточное разделение интервалов времени

Сопоставляя статистические данные, приведенные на рисунках 8-10 и обобщая результаты анализа времени восстановления приняты следующие интервалы времени распределения отказов: 6 часов, 24 часа (одни сутки) и 72 часа (трое

суток), что соответствует характеру распределения температурного режима зданий при отказах.

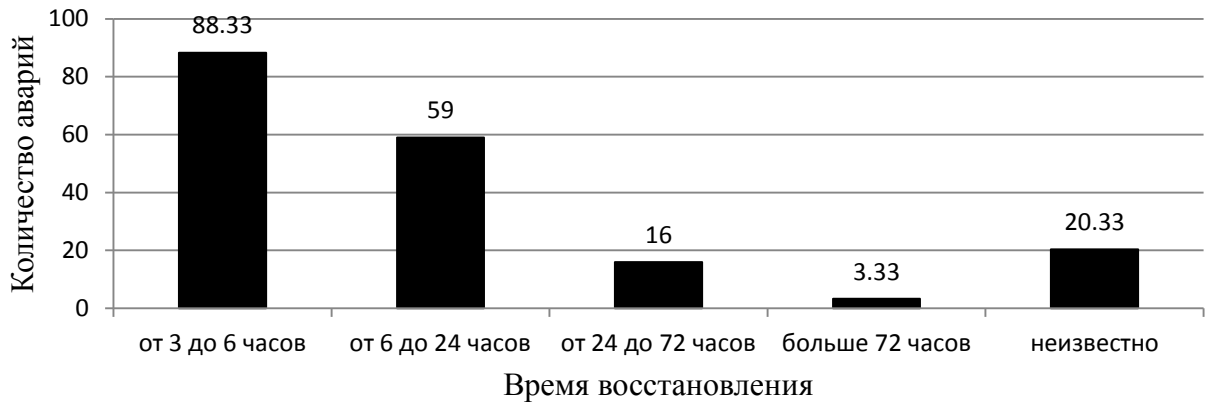


Рисунок 8 - Время восстановления при отказе системы электроснабжения (среднее за 2011-2013 гг.), частое разделение интервалов времени

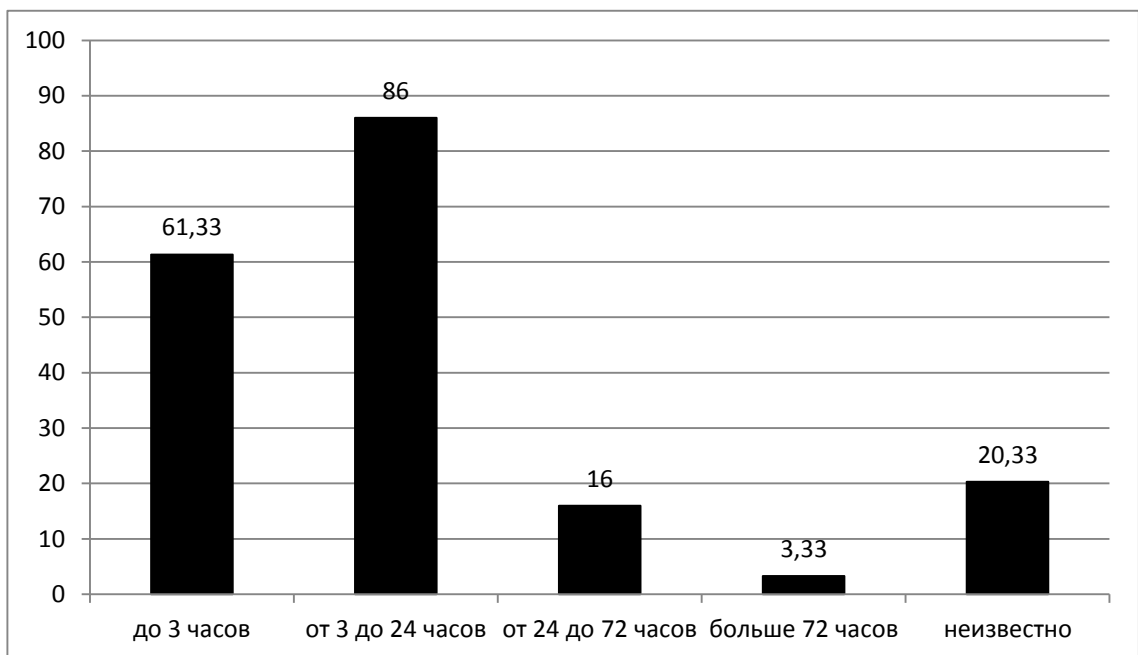


Рисунок 9 - Время восстановления при отказе системы электроснабжения (среднее за 2011-2013 гг.), суточное разделение интервалов времени

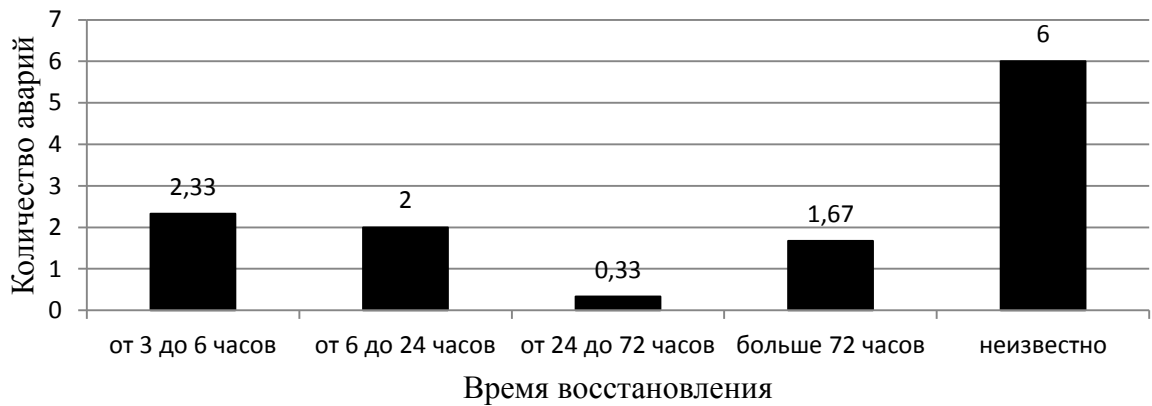


Рисунок 10 - Время восстановления при отказе системы водоснабжения (среднее за 2011-2013 гг.), частое разделение интервалов времени

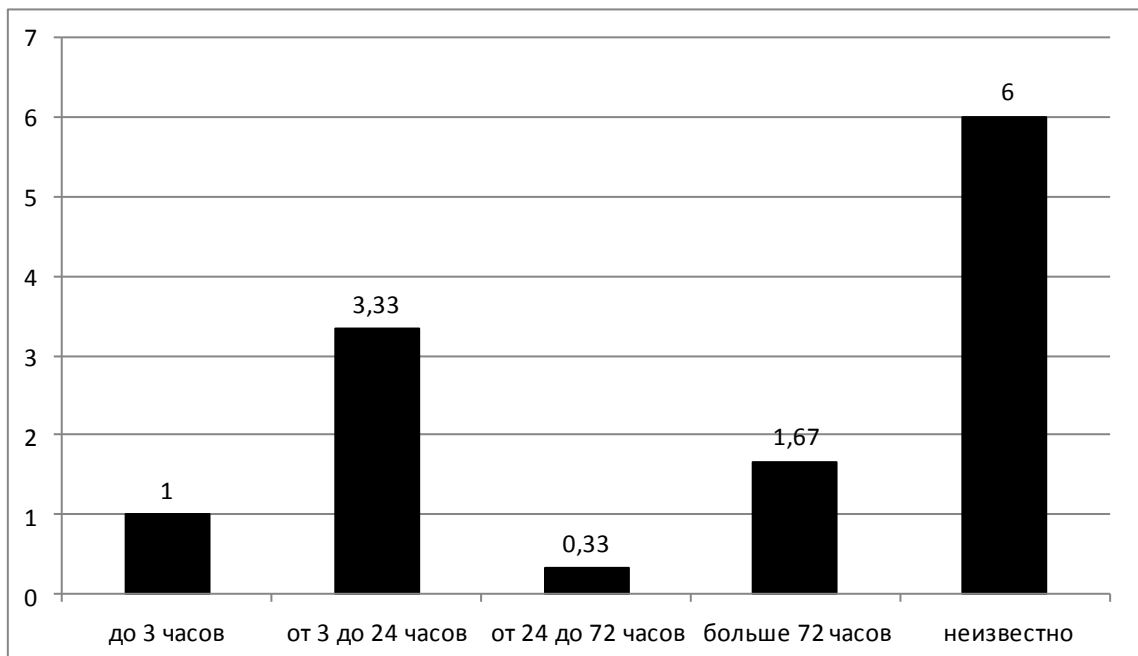


Рисунок 11 - Время восстановления при отказе системы водоснабжения (среднее за 2011-2013 гг.), суточное разделение интервалов времени

Снижение поставки тепла или его прекращение напрямую отражается на качестве жизни населения. Исследования по условиям теплоснабжения потребителей рассмотрены в работах Л.С. Попырина [72, 73, 74, 75] и А.П. Кылатчанова [39]. Аварийные ситуации, связанные с нарушением энергоснабжения зданий, представляют потенциальную опасность неприемлемого ухудшения тепловых условий в помещениях. За аварией в системе теплоснабжения непосредственно следует ограничение поставки тепловой энергии потребителям вплоть до полного остановки ее подачи, что, в свою очередь, приводит к снижению температуры

воздуха в жилых помещениях ниже нормативного значения, равного 18-22°C. В результате растёт уровень заболеваемости населения. Изучение механизма терморегуляции показывают, что чертой гипотермической опасности для человека является температура воздуха в помещении на уровне 14°C [74]. Выше этой температуры обеспечивается равновесие между теплопродукцией организма и его теплообменом с окружающей средой. Длительное пребывание человека при температуре ниже 14°C приводит к охлаждению глубинных тканей и простудным заболеваниям. В своде правил Тепловые сети «СП 124.13330.2012» [97] регламентируется температура пребывания людей в здании, равная 12°C. С учетом приведенного, следует отметить два уровня граничной температуры: $t_{к1}$ – нормальная для жизнедеятельности температура, равная 20°C и $t_{к2}$ – критическая для жизнедеятельности температура, равная 12°C, ниже которой пребывания человека в здании не допустимо. Температура в здании характеризует состояние работоспособности системы энергоснабжения, качества жизнеобеспечения и является одним из характерных показателей тяжести отказа. Анализ температурного режима объектов при авариях позволяют установить три граничные значения температур: 20°C, 12°C и 0°C. Эти границы позволяют выделить следующие состояния: нормального функционирования ($t \geq 20^\circ\text{C}$); опасное состояние ($20^\circ\text{C} > t \geq 12^\circ\text{C}$) и катастрофическое состояние ($t \leq 0^\circ\text{C}$).

Выполненный системный анализ показателей безопасности СЭ позволяет сделать следующие обобщения. Отказы в ЭС сопровождаются комплексом негативных явлений, последствия которых носят экономический, социально-экономический и социальный характер. К одному из показателей тяжести отказов можно отнести совокупный ущерб. В условиях Севера аварии сопровождаются значительным ущербом социального характера. Качество жизни снижается, но прямых случаев гибели людей не отмечается. Система теплоснабжения считается исполняющей свою основную функцию, если здоровью людей не наносится ущерб из-за нарушения снабжения потребителей теплом. Так, одним из показателей качества функционирования энергетической системы является число пострадавших людей. Чем больше будет число пострадавших людей, тем больше будут

социальный ущерб и степень аварийного состояния. Согласно описаниям аварий, некоторые аварии сопровождаются эвакуацией населения в другие населенные пункты. В этом случае социальная часть ущерба значительно повышается. При классификации АС по степени тяжести выделяется четыре параметра, двумя из которых являются число пострадавших и число людей, у которых нарушены условия жизнедеятельности [2]. Подводя итоги анализа, за основные показатели качества функционирования системы энергоснабжения в условиях Севера следует принять время восстановления, температурный режим помещений, совокупный ущерб, количество людей с нарушенными условиями жизнедеятельности и пострадавших (эвакуированных).

Глава 3. Оценка надежности систем энергоснабжения Севера

3.1 Структурное моделирование вероятности аварийных событий

Как показано выше величина риска зависит от вероятности наступления неблагоприятных событий и величины возможного ущерба. Вероятность наступления неблагоприятного состояния является системной характеристикой надежности исследуемого объекта и для оценки риска СТС необходимо знать вероятностные показатели надежности системы.

Надежность объектов энергетики зависит от многих факторов, т.к. они состоят из различных и неоднородных по структуре и содержанию систем, имеющих свои функциональные назначения. Надежность СЭ определяется характеристиками её элементов и структурой системы, и для условий Севера имеет свои отличительные особенности.

Для редких и чрезвычайных событий, к которым можно отнести аварии в СЭ Севера, для анализа надежности всей системы можно использовать метод графо-аналитического исследования структуры причинно-следственных связей факторов, приводящих к аварии [4, 23, 65, 87, 117]. Метод представляет собой анализ системы для выявления возможного хода развития событий и определения их последствий. Существует несколько принципиальных сложностей связанных с определением надежности при помощи сценарного подхода. Используемые математические модели и методы для расчета последствий аварий и отказов технической системы содержат внутри себя значительную нечеткость и неопределенность, связанную с большой сложностью моделируемых объектов и недостаточным знанием путей развития неблагоприятных процессов.

Ниже проводится оценка надежности СЭ децентрализованных потребителей в экстремальных условиях Севера по данным отказов. Для оценки надежности общей СЭ необходимо сначала определить или знать надежность составляющих систем - объектов энергетики. В данной работе показатели надежности исследуются по описаниям аварий объектов энергетики Севера. В описаниях аварий по данным МЧС не содержится профессиональный анализ причин аварий, обычно

вносятся видимые поверхностные причины. Тем не менее, они дают общую картину аварий и могут быть использованы для укрупнённого статистического анализа отказов объектов энергетики.

По базе данных аварий [83] были проанализированы случаи развития АС, и результаты анализа приведены в таблице 2. Например, по причине отсутствия электроснабжения (33 аварии) вышли из строя система водоснабжения (7 аварий) и тепловые сети (6 аварий). При этом следует учесть неполноту учета в описаниях аварий отказов других подсистем. Поэтому данные не дают полного количественного распределения по участию различных систем в развитии аварии.

Если ранжировать элементы системы электроснабжения децентрализованных потребителей в условиях Севера по опасности, то они располагаются в следующем порядке: котельная, тепловые сети, электроснабжение, водоснабжение и топливоснабжение (рисунок 3). Наиболее зависимым и уязвимым элементом, зависящим от надежности вышерасположенных по функциональной схеме энерго-снабжения подсистем, являются тепловые сети (таблица 2). Наибольшее количество аварий происходит в котельных.

Для того чтобы представить взаимосвязь между элементами неоднородной энергосистемы при АС, приведены некоторые описания аварий, произошедших на территории северных населенных пунктов. Для анализа подобраны характерные примеры, в которых содержатся описания разнообразных взаимосвязанных причин и последствий аварий. Ниже приведены некоторые из них:

1. 29 января 1998 года в п. Бейдинга произошло аварийное отключение электроэнергии из-за неисправности трансформатора, вследствие чего остановилась центральная котельная. Было разморожено 133 объекта, 11864 метра тепло-трассы и 300 метров водовода.

2. 29 декабря 1998 года в п. Жилинда из-за отключения электроэнергии между фазами фидера произошло замыкание в результате чего было разморожено 200 метров теплотрассы, 4 жилых дома, пекарня, магазин и дом культуры.

3. 15 января 1999 года в поселке Северный из-за отсутствия резерва дизельного топлива были остановлены два дизель-генератора, потребление электроэнергии было ограничено.

4. 3 января 2001 года в селе Казачье в 23 часа была остановлена котельная из-за течи котла, второй котел запустить не смогли. Была слита вода с пяти жилых домов и четырнадцати частных домов, теплотрассы длиной 1,82 км, конторы ЖКП, здания администрации, конторы ГУП. *Причина:* выход из строя горелок на котлах № 1,2. Ущерб 530 тыс. руб.

5. 16 апреля 2001 года в поселке Эльдикан в результате отсутствия топлива в системе теплоснабжения произошло разморозжение 17 объектов.

10 декабря 2014 года в п. Тикси-3 была остановлена работа котельной из-за поломки двух насосов системы водоснабжения. Работа объектов теплоснабжения и теплотрасса были восстановлены в течение месяца.

Из описаний аварий объектов системы энергоснабжения видно, что отказы имеют место в случае неблагоприятного воздействия одного или нескольких факторов, причем зачастую выход из строя одного элемента приводит к отказу других элементов (таблица 2). Такие процессы принято называть каскадными [30, 43, 56]. Как видно из описания аварий, последовательность событий, приводящая к развитию исходного возмущения и его распространению на другие части системы, имеет место в системе энергоснабжения при низких температурах. Они в значительной мере нарушают функционирование системы, приводят к отказам других элементов и значительным ущербам.

На основе анализа описаний аварий можно составить следующие сценарии аварий и АС в системе энергоснабжения в условиях Севера:

1. Порыв ветра – короткое замыкание или отказ трансформатора или обрыв электролинии или отказ дизель-генератора или отсутствие топлива – отключение подачи электричества – остановка насосов – остановка подачи тепла – низкая температура – промерзание теплосети – промерзание объектов жизнедеятельности – эвакуация населения;

2. Отказ водовода или отсутствие топлива или остановка насосов или отказ в котельной – остановка подачи тепла – низкая температура – промерзание теплосети – промерзание объектов жизнедеятельности – эвакуация населения;

3. Остановка подачи тепла и низкая температура и наличие теплоносителя – промерзание трубопроводов теплосети - промерзание объектов жизнедеятельности – эвакуация населения.

Ущерб от отказа системы энергоснабжения повышается при совпадении нескольких неблагоприятных событий. Совпадение периода низких температур наружного воздуха с внутренним возмущением в системе теплоснабжения может сопровождаться несвоевременным подключением резервов и сливом воды из системы теплоснабжения. Массовое включение населением в домах электрических отопительных приборов может вызвать перегрузку электрических сетей и их выход из строя, тем самым усугубляя аварийное состояние. В результате происходит сокращение подачи тепла в жилые дома, и, следовательно, значительное снижение температура воздуха в жилых помещениях. В некоторых случаях подача тепла может прекратиться. При времени восстановления сутки и более и при наличии большого количества потребителей тепла возникает проблема эвакуации населения.

Для представления данного явления по приведенным сценариям аварий составлена структурная схема развития АС в СЭ в условиях Севера (рисунок 12). Схема представляет собой цепочку событий, связанных причинно-следственными связями развития аварий и составлена на основе приведенных сценариев аварий. Составленная причинно-следственная схема развития аварий представляет собой разветвленную структуру. В схеме четко прослеживается иерархическая связь между её составляющими. Имеется семь уровней по вертикали, при этом события нижнего уровня не могут влиять на события более высокого уровня расположения. В самой верхней части находятся события, зависящие от климатических особенностей (низкая температура, сильный ветер) и от

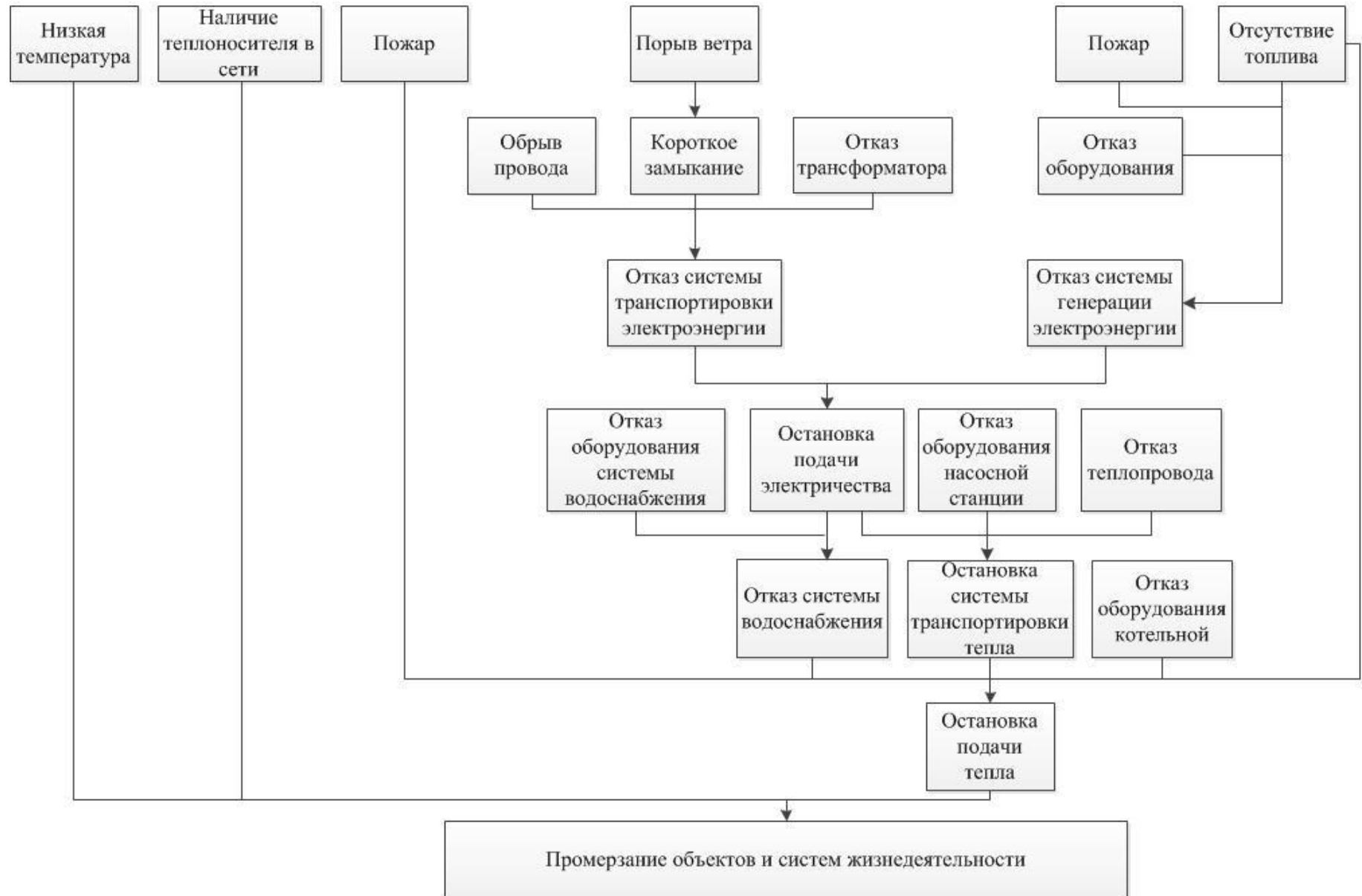


Рисунок 12 - Причинно-следственная структурная схема развития АС

особенностей социальной среды (человеческий фактор, состояние управления). Эти события могут являться причиной отказа технического оборудования и объектов. Ограничение электроснабжения 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 (рисунок 12). 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 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.

Структура причинно-следственных взаимосвязей развития АС, обозначенная выше, является неоднородной и сложной для моделирования. В исходной системе содержится событие, имеющее нескольких входов и выходов (рисунок 12). Поэтому логико-вероятностные методы с логическими связями «и» и «или» нельзя применить напрямую. Для моделирования данной неоднородной системы вносится упрощение в системе. По конечным потребностям СЭ Севера состоит из двух взаимосвязанных сложных систем: системы электроснабжения и системы теплоснабжения, которые можно представить в виде схемы (рисунок 13).

Проанализируем отдельно эти системы. В системе электроснабжения составляющие события имеют один или несколько входов и один выход. Совокупность входящих событий можно принять независимыми друг от друга.

Для упрощения моделирования надежности системы энергоснабжения примем схему в виде дерева отказов (рисунок 14).

На основе проведенного выше анализа АС для оценки надежности системы электроснабжения для представленной схемы дерева отказов можно применить логико-вероятностные методы.

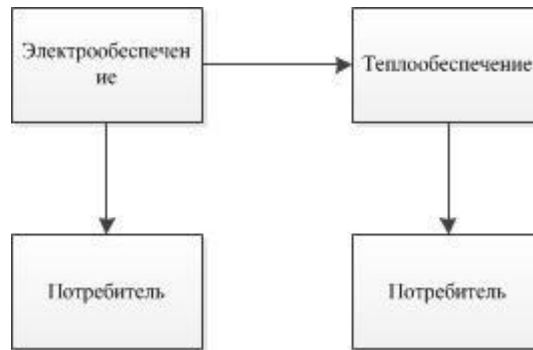


Рисунок 13 - Укрупненная схема энергоснабжения



Рисунок 14 - Дерево отказов системы электроснабжения

Рассмотрим моделирование надежности системы теплоснабжения. Наиболее простым для определения количественных показателей надежности системы теплоснабжения является метод дерева событий (рисунок 15). Возможность применения метода дерева событий для определения количественных показателей, характеризующих вероятность аварии систем теплоснабжения, в схематичном виде предложено в работе Л.С. Попырина [72]. Метод дерева событий позволяет осуществлять последовательный перебор развития возможных АС. Системное дерево событий состоит из таблицы и диаграммы. Таблица событий

отражает структурную последовательность событий, слева размещается исходное событие, справа - конечное событие, а между ними размещаются события, относящиеся к отказам обеспечивающих систем. За исходное событие принимается событие «низкая температура». Отказ в системе теплоснабжения чрезвычайного характера имеет место при низкой температуре, и частота аварий повышается с понижением 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 (рисунок 15). За возможные промежуточные события приняты: пожар, ограниченный запас топлива, отключение электроснабжения, остановка циркуляционных насосов, отказ системы водоснабжения, отказ оборудования котельной и отказ теплосети. Имеются различные возможные варианты развития событий. Каждое событие потенциально может быть причиной события «остановка подачи тепла». 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 не освобождается от теплоносителя, то реализуются множество различных последствий. По данной методике составлено семи уровневое дерево событий (рисунок 15). Суммировав исходы по разным возможным путям, можно получить вероятность конечного события. Для каждого потока событий будет своя вероятность реализации событий. Сравнение этих значений может помочь определить более ненадежные соотношения событий.

исходное событие	событие А	событие В	событие С	событие D	событие Е	событие F	событие G	конечное состояние
период похолодания	пожар	ограниченный запас топлива	отключение электроснабжения	отказ циркуляционных насосов	отказ системы водообеспечения	отказ оборудования котельной	отказ теплосети	остановка подачи тепла

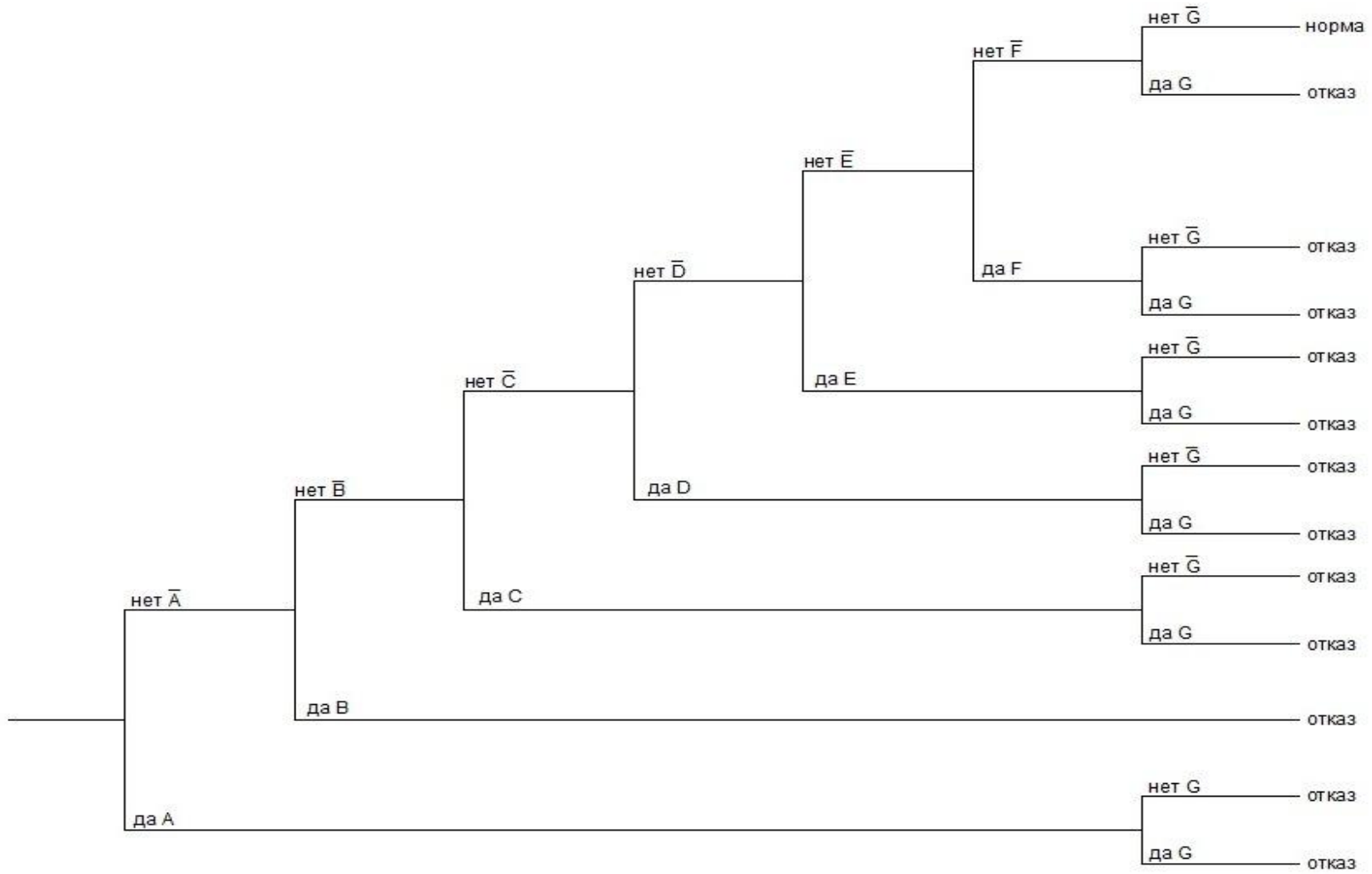


Рисунок 15 - Дерево событий системы теплоснабжения

По результатам анализа и установления причинно-следственной структуры развития АС может быть построена вероятностная модель надежности децентрализованной СЭ Севера.

3.2 Определение вероятности аварийных событий

Выше показано, что для разработки вероятностной модели надежности системы децентрализованной энергетики может быть использован метод «дерева событий». Выделены семь определяющих событий: пожар - событие А; ограниченный запас топлива - событие В; отключение электроснабжения - событие С; отказ циркуляционных насосов - событие D; отказ системы водоснабжения - событие Е; отказ оборудования котельной - событие F; отказ теплосети - событие G. На рисунке 16 для каждого события показаны вероятности его исхода. Через P_j обозначены вероятность безотказности события, а Q_j – вероятность отказа. Они являются совместными $P_j=1-Q_j$.

Если события независимы, то вероятность реализации конечного события данной последовательности равна произведению вероятностей отдельных событий этой последовательности. Вероятность события обозначена буквой $P^{(i)}$, где i - номер исхода. По формуле произведения вероятностей событий получается вероятность события «остановка подачи тепла». В данном случае имеет место тринадцать различных вариантов несовместимых конечных событий. Вероятности исходов конечных событий определяются по зависимостям согласно схемы, приведенной на рисунке 16:

$$B_1 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_F \cdot P_G;$$

$$B_2 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_F \cdot Q_G;$$

$$B_3 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot Q_F \cdot P_G;$$

$$B_4 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot Q_F \cdot Q_G;$$

$$B_5 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot Q_E \cdot P_G;$$

$$B_6 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot Q_E \cdot Q_G;$$

$$B_7 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot Q_D \cdot P_G;$$

(3.1)

$$B_8 = P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot Q_D \cdot Q_G;$$

$$B_9 = P_A \cdot P_B \cdot Q_C \cdot P_G;$$

$$B_{10} = P_A \cdot P_B \cdot Q_C \cdot Q_G;$$

$$B_{11} = P_A \cdot Q_B;$$

$$B_{12} = Q_A \cdot P_G;$$

$$B_{13} = Q_A \cdot Q_G.$$

Для получения количественного результата надежности децентрализованной ЭС необходимо знать значения вероятности отказов подсистем энергетики. Для определения вероятности отказа системы электроснабжения можно применить метод дерева отказов. Рассматривается структурная схема дерева отказов (рисунок 17). На основе проведенного выше анализа АС для оценки надежности системы электроснабжения для приведенной схемы дерева отказов можно применить логико-вероятностные методы. Построение дерева отказов начинается снизу вверх. Событие «отказ системы генерации электричества» является следствием реализации хотя бы одного из трех событий: отказа оборудования, пожара или ограниченного обеспечения топливом объекта генерации электроэнергии. Отказ системы транспортировки электрической энергии возможен при отказе трансформатора или при отказе в линии электропередачи. Снижение мощности или полный отказ системы подачи электроэнергии потребителям может иметь место при появлении хотя бы одного из событий, таких как отказ системы генерации электричества и отказ системы транспортировки электроэнергии.

В данном дереве отказов (рисунок 17) взаимосвязи между исходными событиями и событиями, приводящими к возникновению разнообразных АС, можно выразить логическими знаками «или». Выходное событие логического знака «или» наступает, если имеет место любое из входных событий.

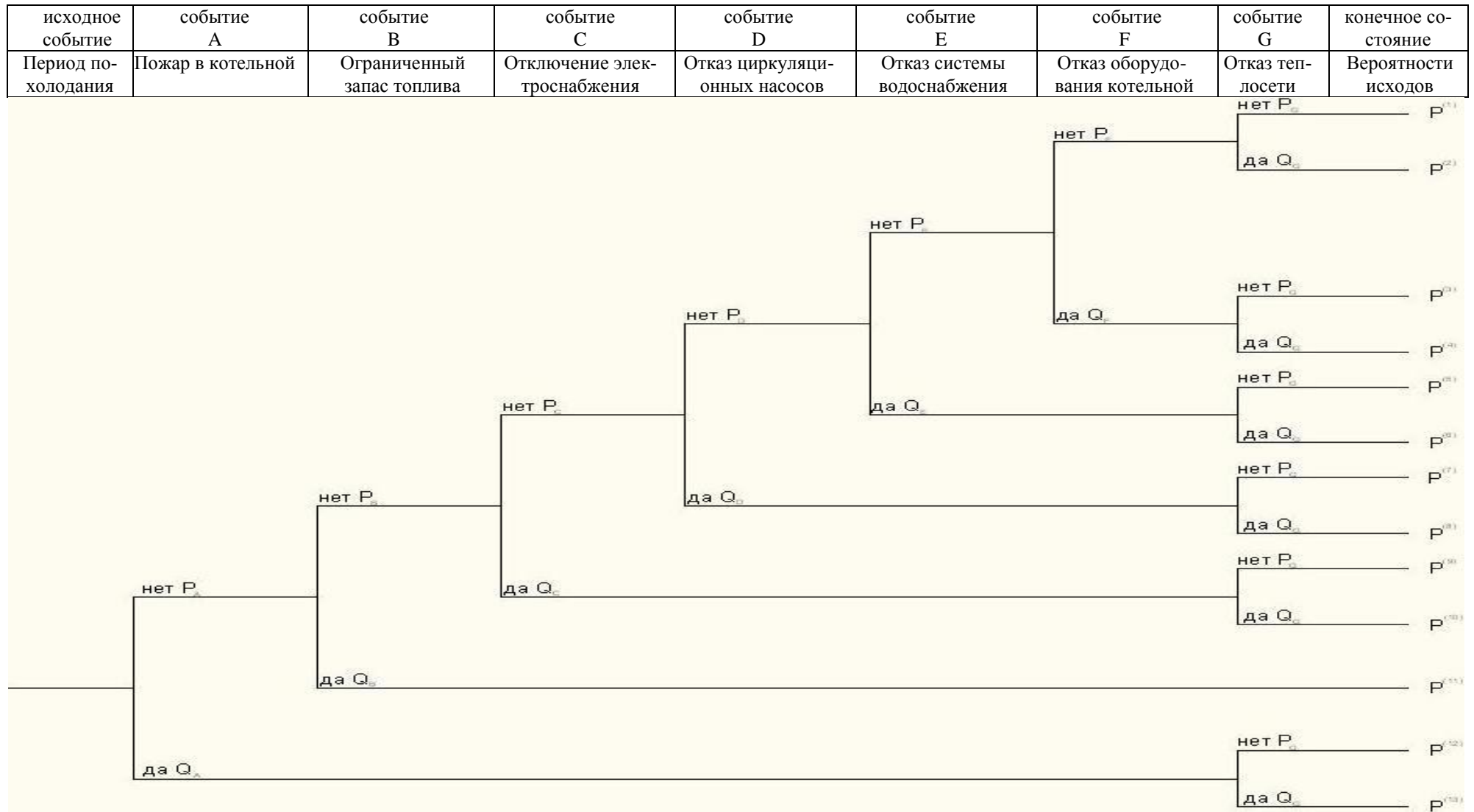


Рисунок 16 - Вероятностная схема дерево событий

Событие основного уровня обозначим как ОПЭ - остановка подачи электричества. События второго уровня: ОЭ - отказ системы электрогенерации; ТЭ - отказ системы транспортировки электроэнергии. События третьего уровня: ЛЭ - отказ в линии электропередачи; ТР - отказ трансформатора; ОС - отказ оборудования системы электрогенерации; ПЭ – пожар в системе электрогенерации; ЗТ – ограниченный запас топлива для электрогенерации.

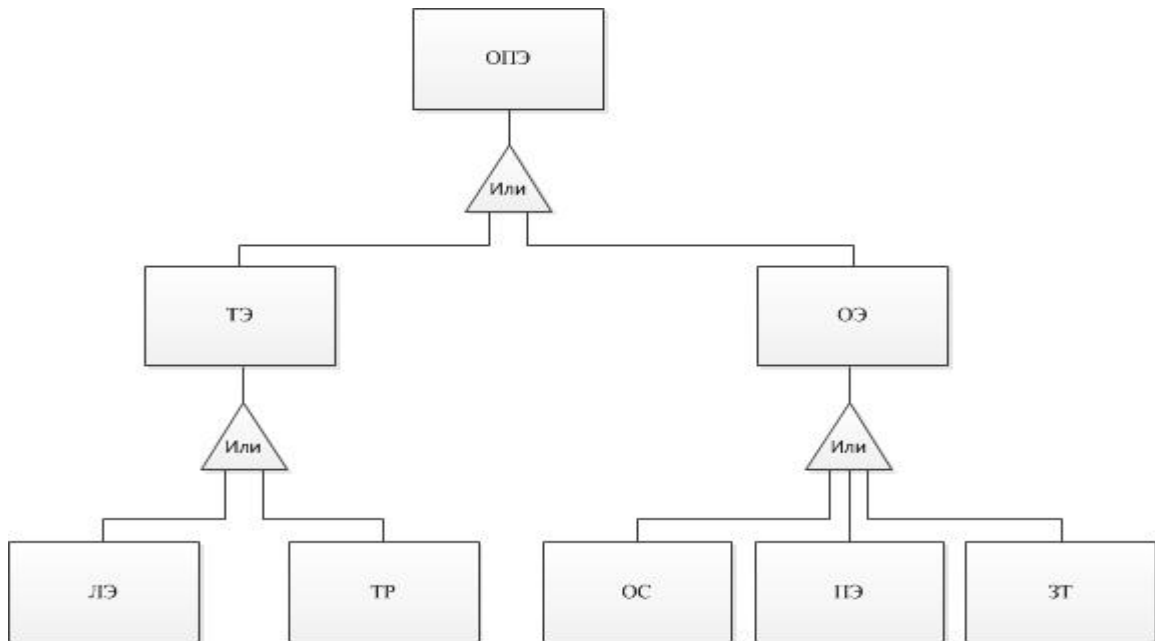


Рисунок 17 - Дерево отказов системы электроснабжения

Рассмотрим событие отсутствия электричества, которое реализуется при проявлении хотя бы одного из входных событий: «отказ системы электрогенерации» и «отказ системы транспортировки электроэнергии». Их логическая связь описывается знаком «или» и представляет собой сумму неблагоприятных событий:

$$\text{ОПЭ} = \text{ОЭ} + \text{ТЭ}. \quad (3.2)$$

Тогда вероятность события ОПЭ как отказ определяется как вероятность суммы событий и может быть вычислена по зависимости:

$$Q(\text{ОПЭ}) = 1 - ((1 - Q(\text{ОЭ})) \cdot (1 - Q(\text{ТЭ}))), \quad (3.3)$$

где $Q(\text{ОПЭ})$ - вероятность отказа системы подачи электроэнергии; $Q(\text{ОЭ})$ - вероятность отказа системы электрогенерации; $Q(\text{ТЭ})$ - вероятность отказа системы транспортировки электроэнергии.

Событие «отказ системы транспортировки электроэнергии» реализуется при проявлении хотя бы одного из входных событий, как «отказ в линии электропередачи» или «отказ трансформатора». Их логическая связь описывается знаком «или» и представляет собой суммы неблагоприятных событий:

$$TЭ = ЛЭ + ТР. \quad (3.4)$$

Тогда вероятность события ТЭ как отказ определяется как вероятность суммы событий и может быть вычислена по зависимости:

$$Q(TЭ) = 1 - ((1 - Q(ЛЭ)) \cdot (1 - Q(ТР))), \quad (3.5)$$

где $Q(ЛЭ)$ - вероятность отказа в линии передачи электроэнергии; $Q(ТР)$ - вероятность отказа трансформатора.

Событие «отказ системы электрогенерации» реализуется при проявлении хотя бы одного из входных событий, таких как «отказ оборудования системы электрогенерации», «пожар в системе электрогенерации» или «ограниченный запас топлива для электрогенерации». Их логическая связь описывается знаком «или» и представляет собой суммы неблагоприятных событий:

$$OЭ = OC + ПЭ + ЗТ. \quad (3.6)$$

Тогда вероятность события OЭ как отказ определяется как вероятность суммы событий и может быть вычислена по зависимости:

$$Q(OЭ) = 1 - ((1 - Q(OC)) \cdot (1 - Q(ПЭ)) \cdot (1 - Q(ЗТ))), \quad (3.7)$$

где $Q(OC)$ - вероятность отказа оборудования системы электрогенерации; $Q(ПЭ)$ - вероятность пожара в системе электрогенерации; $Q(ЗТ)$ - вероятность ограниченного запаса топлива для электрогенерации.

Определение надежности элементов системы можно провести по известной статистике аварийных событий на однотипных объектах. Для количественного определения вероятности отказа подсистем энергосистемы можно использовать статистические данные по аварийности. Статистическая оценка вероятности отказа оборудования по данным статистики об отказах определяется по формуле [1, 69]:

$$\overline{Q(t)} = \frac{n(t)}{N_0 \cdot \Delta \tau}, \quad (3.8)$$

где N_0 - число элементов в начале работы (испытаний); $n(t)$ — число отказавших элементов за время t ; Δt – временной промежуток.

Расчет проводится в допущении, что объекты энергоснабжения относятся к однотипным. Принимается, что интенсивность отказов установилась и приблизительно постоянная. В этом случае вероятность отказа распределяется по экспоненциальному закону. Моделирование проводится в первом приближении при наличии малой статистики.

Количество котельных в РС(Я) равно $N= 1576$. Статистика АС собрана за 11 лет, $\Delta t=11$. Ниже даны оценки вероятности отказов для различных причин их возникновения.

1. Количество отказов при возникновении пожаров равно 41. Вероятность отказов \bar{Q} равна 0.00325.

2. Количество отказов по причине отказа электроснабжения равно 16 (29). Вероятность отказов \bar{Q} равна 0.0023.

3. Количество отказов n по причине отказа циркуляционного насоса равно 17 (16). Вероятность отказов \bar{Q} по причине отказа циркуляционного насоса равна 0.0013.

4. Количество отказов n по причине отказа тепловых сетей равно 27. Вероятность отказов \bar{Q} по причине отказа тепловых сетей равна 0.0021.

5. Количество отказов n по причине отказа системы водоснабжения равно 20. Вероятность отказов \bar{Q} по причине отказа системы водоснабжения равна 0.0016.

6. Количество отказов n по причине отказа оборудования котельной равно 46 (49). Вероятность отказов \bar{Q} по причине отказа оборудования котельной равна 0.0039.

7. Количество случаев недопоставки топлива потребителям равно 8. Вероятность неполного обеспечения топливом потребителей равна 0.0006.

Вычисленные вероятности отказа отдельных элементов и подсистем СЭ Севера можно использовать при оценке безопасности СЭ.

Полученные данные недостаточны, т.к. не для всех элементов СЭ Севера имеется статистика их отказов. Поэтому для сравнения и дополнения данных можно использовать показатели отказа оборудования идентичных объектов по данным различных литературных источников. Например, данные о 143 нарушениях нормальной работы электрооборудования по предприятию «Северные электрические сети» приведены в работе [111]. Отказы распределены следующим образом:

- двигатели внутреннего сгорания - 26,6%;
- вспомогательные оборудования к ним - 11,2%;
- силовые трансформаторы - 9,1%;
- подвесная линейная изоляция - 9.1%;
- масляные выключатели, разъединители, короткозамыкатели - 7%;
- обрыв проводов ЛЭП - 7,7%;
- кабельные линии - 5,6%;
- генераторы - 8,3%;
- выпучивание опор и разрушение ЛЭП ветровой нагрузкой -4.1%;
- повреждение опор транспортными средствами - 4,2%/

Анализ статистической информации по авариям оборудования ТЭС, выполненный по данным Союзтехэнерго за период 1978-1983 и 1986-1987 гг. представлен в [42]. В таблице 7 приведены данные по средним значениям количества аварий и частоты для каждого типа оборудования в период с 1978 по 1987 гг. На основании данных Союзтехэнерго в таблице 8 показана динамика повреждений основного и вспомогательного котельного оборудования и их частота.

Таблица 7 - Частота аварий по типам оборудования

Оборудование	1978	1979	1980	1981	1982	1983	1985	1986	Среднее значение
Котлы	0,016	0,018	0,029	0,036	0,021	0,034	0,038	0,021	0,027
Турбины	0,057	0,074	0,057	0,06	0,068	0,066	0,047	0,03	0,057
Эл.оборудование	0,044	0,061	0,047	0,036	0,056	0,032	0,06	0,045	0,048
Всего аварий	0,118	0,153	0,133	0,132	0,145	0,133	0,144	0,097	0,132

Таблица 8 - Динамика повреждений котельного оборудования

Показатель	1980	1981	1982	1983	1985	1986
Число от-казов	3277	3479	3519	3347	3233	2525
Частота, соб/год	8,091	8,363	8,261	7,677	7,184	5,442

Обобщая выше приведенный анализ, представляется алгоритм методики определения надежности децентрализованной энергетики Севера:

1. Определяются вероятности отказа системных элементов по статистическим данным аварийности типового оборудования из различных баз данных и литературных источников;
2. Определяется вероятность отказа системы электроснабжения;
3. Определяются вероятности аварий в системе теплоснабжения для различных сценариев реализации негативных событий по зависимостям.

По зависимостям (3.1) определены вероятности исходов конечных событий:
 $B_1 = 0.985$; $B_2 = 0.0021$; $B_3 = 0.00385$; $B_4 = 0$; $B_5 = 0.0016$; $B_6 = 0$;
 $B_7 = 0.0013$; $B_8 = 0$; $B_9 = 0.0023$; $B_{10} = 0$; $B_{11} = 0.0006$; $B_{12} = 0.0032$; $B_{13} = 0$.

Исследование надежности децентрализованных СЭ имеет важное самостоятельное значение. Методика определения надежности децентрализованной СЭ отличается от аналогичных для централизованной системы и обуславливается повышенными требованиями к условиям жизнеобеспечения населения в условиях Севера. Предложенная методика расширяет возможности определения надежности СЭ в условиях Севера.

3.3. Резервирование надежности систем энергоснабжения

Одним из способов повышения надежности технического объекта является резервирование. В ГОСТ 27.002-83 резервированием называют использование дополнительных средств или возможностей с целью сохранения работоспособности объекта при отказе его элементов. Для СЭ [48, 53, 54, 93] резервирование трактуют как повышение надежности объекта за счет введения избыточности. Под из-

быточностью понимают дополнительные средства и возможности, сверх минимально необходимых, для выполнения объектом заданных функций. То есть, резервом могут быть не только технические средства, но и способы управления, регулирования режимов системы и ее объектов. Задача выбора необходимой величины мощности аварийного резерва может быть решена:

- сопоставлением затрат на мощность аварийного резерва с уменьшением ущерба, который возникает из-за отказов оборудования электростанций;
- обеспечением требуемой надежности электроснабжения потребителей при минимальных затратах на мощность аварийного резерва.

Для повышения надежности систем энергоснабжения применяется структурное резервирование введением дополнительных элементов сверх минимально необходимых для нормального выполнения объектом заданных функций. В этом случае отказ наступает только после отказа основного элемента и всех резервных элементов. Структура резервированной системы представляется в виде параллельно соединенных элементов. В этом варианте резервирования применимо правило определения надежности параллельно соединенных независимых элементов. В случае с постоянно включенным резервом надежность блока P_c определяется по формуле [7, 69]:

$$P_c = 1 - \prod_{i=0}^m (1 - P_i) = 1 - \prod_{i=0}^m Q_i, \quad (3.5)$$

где m – количество резервных элементов; P_i – вероятность безотказной работы i -го элемента; Q_i – вероятность отказа i -го элемента.

Вероятность безотказной работы системы при резервировании с замещением определяется по зависимости [69]:

$$P_c = P_0 + \sum_{i=1}^m f_0 \cdot f_1 \cdot \dots \cdot f_{i-1} \cdot P_i, \quad (3.6)$$

а если интенсивность отказов элементов λ постоянна, то она определяется по зависимости:

$$P_c = \sum_{j=0}^m \frac{(\lambda t)^j}{j!} e^{-\lambda t}, \quad (3.7)$$

где P_0 – вероятность безотказной работы основного элемента ; f_0 – плотность рас-

предела времени до отказа основного элемента; f_i – плотность распределения времени до отказа i -го элемента; λ – интенсивность отказов элементов, c^{-1} ; t – время, с.

Резервирование – основной способ поддержания заданного уровня надежности при недостаточно надежных элементах системы энергетики. В этом случае применяются вероятностные модели и выбор резерва проводится из условия не снижения надежности:

$$Q < Q_d. \quad (3.8)$$

В данной постановке критерий надежности определяется как системная надежность, при этом определяемая вероятность отказа системы энергетики должна быть меньше допустимого значения. Пороговое значение допустимой надежности Q_d можно принять на уровне 10^{-5} .

Дополнительные элементы, вводимые в структуру объекта, представляют собой средства структурного резервирования. В ОЭ может резервироваться различное оборудование. Резервные элементы позволяют поддерживать достаточно высокий уровень функционирования в периоды ремонтов, заменять отказавшие агрегаты при авариях. Методику резервирования из условия допустимой надежности в системе энергетики можно применить для повышения надежности циркуляционных насосных систем теплоснабжения. В условиях Севера для отопления населенных пунктов длины магистральных трубопроводов достигают нескольких километров. Как показывает статистика аварий систем теплоснабжения, отказы циркуляционных насосов являются одной из основных причин аварий. Насосы как элементы системы являются простыми, достаточно недорогими относительно других системных элементов, легко заменяются, и не требуют высокой квалификации персонала для монтажа и обслуживания. Поэтому количество резервных насосов можно определить использованием зависимостей (3.5, 3.6, 3.7) по схеме параллельного соединения элементов. Вероятность отказов \bar{Q} по причине отказа циркуляционного насоса равна 0.0013, в случае одного насоса вероятность безотказной работы равна 0,9987, вероятность безотказной работы в случае наличия

двух насосов равна 0,999998.

Для более сложного и дорогостоящего генерирующего оборудования энергетики для резервирования применяется условие эффективности. Задача резервирования состоит в нахождении такого количества резервных образцов оборудования в каждой ступени, которое будут обеспечивать необходимый уровень надежности системы при наименьшей стоимости. Выбор наилучшего варианта зависит главным образом в степени увеличения надежности, которую можно достичь при возможных расходах. Для определения рационального уровня резервирования требуется определить средства, направляемые на увеличение надежности с получаемым экономическим эффектом. Для решения этой задачи требуется выбрать критерии оптимизации. Резервирование требует привлечения дополнительных материальных и трудовых затрат.

Решение задачи эффективности выбор аварийного резерва системы осуществляется из условия минимума приведенных затрат с учетом ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям [7, 11, 34, 91]:

$$Z = Z_{\Delta P} + U \rightarrow \min, \quad (3.9)$$

где $Z_{\Delta P}$ – капиталовложения и ежегодные эксплуатационные затраты в системе на установку в ней агрегатов мощностью сверх необходимой по балансу мощности; U - математическое ожидание ущерба от недоотпуска электроэнергии потребителям при располагаемой мощности системы.

Для повышения надежности СЭ Севера применяются различные виды резервирования. Резервы различаются по своему воплощению и назначению. В системе энергетики можно применить три вида резервирования: структурное, временное и нагрузочное. В СЭ на Севере располагаемые мощности в основном превышают энергопотребности. Увеличение мощности энергогенераторов относится к способам нагрузочного резервирования. Для подсистем СЭ обычно применяется поэлементное структурное резервирование. В основном резервируются такие виды оборудования, как энергогенератор, котел и насосы. В основном стараются использовать в виде резерва однородные элементы. Также для повышения надежности системы генерации электроэнергии нужно рассмотреть и изучить варианты

параллельного использования экологически безопасной солнечной и ветровой энергии. Так как их введение повышает надежность электроснабжения, то они относятся к структурному резервированию. Кроме того их использование приведет к снижению топливной потребности дизельных электростанций. То есть использование солнечной и ветровой энергии можно отнести также и к временному резервированию топливной системы. И при обосновании применения их эффективности необходимо учитывать факторы повышения надежности и экономии топлива. В системе снабжения топливом для децентрализованных энергообъектов, находящихся в северных районах, предусматривается наличие дополнительного запаса топлива больше, чем годовой с целью недопущения остановки энергоснабжения населенных пунктов. Поэтому резервирование топлива можно отнести к временному резервированию. Такой резерв значительно увеличивает стоимость производства электроэнергии. В настоящее время вопросы оптимального объема и продолжительности временного резервирования теоретически не обоснованы.

Ниже предлагается схема резервирования элементов децентрализованной СЭ Севера (рисунок 18). Выше рассмотрен пример резервирования системы генерации электричества определением оптимального количества однотипных агрегатов. Также применяется нагрузочный резерв путем содержания систем с мощностью, превышающей предельно максимальную потребность. В последнее время для северных населенных пунктов начали использовать возобновляемые виды энергии, такие как ветровая энергия и солнечная энергия. Они могут быть рассмотрены как подсистемы структурного резервирования. Для системы теплогенерации введение структурного резерва также повышает надежность системы.

Для повышения надежности топливоснабжения можно резервировать дополнительный запас топлива, больше чем годовой. Такие запасы эффективно накапливать не для каждого населенного пункта, а централизованно в доступных местах из условия своевременной доставки наземным транспортом. Для некоторых теплогенерирующих оборудования можно использовать различные виды топлива, например твердого и жидкого. Использование возобновляемых источников электроэнергии приводит к значительной экономии топливных ресурсов, по-

этому их можно считать и как способ временного резерва топливной системы. В системе транспортировки теплоносителя используются резервные циркулирующие насосы. Их необходимо в обязательном порядке предусматривать для каждой котельной. Надежность системы теплоснабжения в большей степени зависит от состояния теплосетей. Повышение надежности может быть достигнуто организацией управления аварийным сливом теплоносителя из трубопроводов. Управленческий резерв представляет огромный внутренний ресурс в повышении общей надежности функционирования системы энергоснабжения потребителей в условиях Севера.



Рисунок 18 - Схема резервирования

Глава 4. Методика оценки безопасности систем децентрализованной энергетики

4.1. Классификация аварийных ситуаций в системе децентрализованной энергетики Севера

В предыдущей главе приведена методика определения надежности, разработанная для децентрализованной СЭ. Однако полученные оценки надежности не в полной мере позволяют оценить аварийное состояние СЭ Севера. Комплексным системным свойством децентрализованных СЭ является безопасность и параметром ее определяющим принимается риск (глава 2). Риск вычисляется путем умножения вероятности отказа на ущерб, что позволяет оценивать риск в денежных или натуральных единицах. Основное назначение стоимостных показателей - установить единую универсальную меру для оценки аварии, что является важным для системы энергетики в условиях Севера. В этом случае появляется возможность реализации экономического подхода при выборе мероприятий, направленных на обеспечение необходимого уровня безопасности. Стоимостные показатели позволяют наиболее обоснованно употребить оптимизационный подход к принятию решений с одновременным учетом разнородных факторов.

Аварии, происходящие в зимний период с критически низкими температурами наружного воздуха, сопровождаются значительными ущербами, остановкой или снижением энергоснабжения, эвакуацией населения в другие населенные пункты, а восстановительные работы требуют больших финансовых расходов. Эвакуационные расходы на перевозку пострадавших в другие населенные пункты и их содержание в период ликвидации последствий от аварии также требуют больших расходов. Как показано выше (таблица 4) потери от заморозения объектов и социальные потери от эвакуации населения могут быть на порядок больше, чем материальные потери от отказа оборудования. В настоящее время не существует единой методики определения ущербов, необходимых в задачах прогнозирования риска, особенно в его социальной части.

Если итогом выполнения всех этапов анализа риска является качественное описание сценариев развития неблагоприятных ситуаций и оценка вероятности их

возникновения, то следующим этапом исследования является оценка размеров возможного ущерба. Ущерб является одним из определяющих факторов оценки безопасности системы энергетики, и может означать утрату или ухудшение свойств объекта, имущества и вред окружающей среде. Он может быть выражен в денежной форме и включать как прямые убытки, так и косвенные. В ряде случаев косвенные убытки во много раз превышают размер прямых убытков. Определение ущерба применительно для СЭ Севера имеет свои особенности. Общие методики количественной оценки рисков различных видов человеческой деятельности, как и рисков различных опасных природных явлений, в настоящее время отсутствуют. Это относится и к процедуре оценки вероятности возникновения опасного события, и к процедуре оценки величины ущерба. Поэтому неизбежно полученные оценки носят укрупненный, оценочный характер.

В условиях Севера в объектах децентрализованной энергетики возможны отказы объектового (локального), местного, территориального и регионального уровня распространения. В работе рассматривается методика обобщенного определения величины относительного ущерба. Для целей прогнозирования риска можно применить обобщенный ущерб, отнесенный к минимальному размеру оплаты труда. Допускается гипотеза, что приведенные, обобщенные значения ущерба включают все составляющие, возможные при авариях в децентрализованных СЭ Севера. За основу принимаются величины относительных ущербов, установленные в постановлении Правительства РФ от 21.05.2007 г., представленные в таблице 3. Для применения данного подхода необходимо определить класс аварийного состояния.

Аварии в системе децентрализованной энергетики Севера можно разделить на три класса – незначительные аварии, значительные аварии и аварии чрезвычайного характера. Эти аварии можно обозначить как чрезвычайные случаи местного, территориального и регионального уровня. По итогам проведенного анализа последствий аварий предлагается классификация тяжести последствий для децентрализованной системы энергетики. Принимается три класса тяжести последствий АС (незначительные, значительные и чрезвычайные):

1. Аварии чрезвычайной ситуации местного характера. К авариям с незначительной тяжестью последствий относятся отказы, приводящие к снижению объема потребления электро- и теплоэнергии и 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, отказ трансформатора, отказ элементов дизельных станций.

2. Аварии чрезвычайной ситуации территориального уровня. К авариям со значительной тяжестью последствий можно отнести аварии, приводящие к остановке подачи тепла в здания и снижению качества жизни населения. Такие отказы имеют место при остановке подачи электричества, отказе системы водообеспечения, при наличии низкого качества или недостаточного объема топлива, способствующие промерзанию теплосети и быстрому остыванию температуры зданий. Восстановление энергоснабжения возможно с участием территориальных сил.

3. Аварии чрезвычайной ситуации регионального уровня. К авариям чрезвычайной или высокой тяжести последствий можно отнести аварии, приводящие к снижению качества жизни, замораживанию объектов жизнеобеспечения населения и эвакуации населения. Восстановление энергоснабжения возможно с участием региональных сил.

4.2. Обобщенная методика определения ущерба

В предыдущем параграфе показано, что в условиях Севера возможны три класса аварийного состояния системы энергетики: местное, территориальное и региональное. На основе проведенного анализа показателями, определяющими тяжесть последствий при авариях СЭ, могут быть приняты время отключения энергоснабжения, температура в зданиях при ограничении и остановке подачи тепла, обобщенный ущерб и количество потерпевших людей, и число людей с нарушен-

ными условиями жизнедеятельности. Критериальные значения времени отключения энергоснабжения, температуры в зданиях при ограничении и остановке подачи тепла приведены во втором разделе. Число людей с нарушенными условиями при отказе системы энергоснабжения определяется числом людей проживающих в жилых домах, которые обеспечиваются теплом с аварийной системы теплоснабжения. А количество потерпевших людей будет определяться количеством эвакуированных людей. Количество потерпевших людей и число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности характеризует социальную часть ущерба, время отключения энергоснабжения, температура в зданиях при ограничении и остановке подачи тепла – социально-экономическую, а материальная часть – чисто экономическую составляющую общего ущерба. Из четырех показателей, установленных в положении о классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера (таблица 9), для децентрализованного энергоснабжения могут быть использованы: число пострадавших людей, число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности, относительный материальный ущерб. Число пострадавших людей при авариях СЭ будет определяться наличием эвакуации населения в другие населенные пункты. В случае ограничения тепла эвакуация отсутствует. В первом приближении граничные значения числа людей, у которых нарушены условия жизнедеятельности и относительного материального ущерба трех принятых классов будут соответствовать величинам, приведенным в таблице 9. Число людей, у которых нарушены условия жизнедеятельности, в случае аварии регионального уровня включает два критерия: число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности более 500 человек или число пострадавших людей (эвакуация) более 50 человек. С учетом приведенного анализа и предыдущих результатов исследования, можно установить виды показателей и их граничные значения для трех аварийных состояний системы децентрализованной энергоснабжения:

1. Аварии чрезвычайной ситуации местного характера. Время восстановления ограничивается временем более шести часов, но менее 24 часов. Снижение температуры в зданиях ограничивается выше критической ($t \geq t_{кр} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$),

но ниже комфортной ($20\text{ }^{\circ}\text{C}$). Относительный материальный ущерб к МРОТ находится в пределах $5 \cdot 10^3$. Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности не более 300 человек;

2. Аварии чрезвычайной ситуации территориального уровня. Время восстановления подачи тепла ограничивается тремя сутками. Температура в зданиях ниже критического значения ($t < t_{\text{кр}} = 12\text{ }^{\circ}\text{C}$). Относительный материальный ущерб к МРОТ находится в пределах от $5 \cdot 10^3$ до $5 \cdot 10^5$. Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности более 300 человек, число пострадавших людей (эвакуация) более 50 человек;

3. Аварии чрезвычайной ситуации регионального уровня. Характеризуются значительным временем восстановления, выше 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 людей (эвакуация) более 100 человек.

Для построения модели классов первичные данные о каждой АС представляются в виде множества чисел $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$. Каждый j -й ($j=1, \dots, 3$) класс выделяется с помощью пяти параметров, определенных на дискретном множестве состояний и характеризующих последствия АС: x_1 – время восстановления теплоснабжения; x_2 – температурный режим в зданиях; x_3 – относительный материального ущерба к МРОТ; x_4 – число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности; x_5 – число пострадавших (эвакуированных).

С учетом проведенного экспертного анализа для каждого показателя установлены их граничные значения (таблица 9). С помощью приведенной в таблице классификации перейдем от описания АС на непрерывном множестве состояний к дискретной схеме, т.е. путем сопоставления первичных данных из описаний аварий с критериальными значениями, приведенными в таблице, классифицируем АС по степени тяжести (отнесем их к одному из трех классов). Вид АС задается дискретной переменной $z = \{z_j (j=1, \dots, 3)\}$: z_1 – местная, z_2 – территориальная, z_3 – региональная АС.

Таблица 9 - 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, °С	$20 > x_2 > 12$	$0 < x_2 \leq 12$	$x_2 \leq 0$
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)	-	$50 < x_5 \leq 100$	$x_5 > 100$

Ниже представлен анализ последствий характерных описаний аварий для установления и классификации их по степени тяжести.

1. 27 ноября 2002 года в п. Солнечный в 15 час. 15 мин. из-за погодных условий произошло отключение электроэнергии. Без электроэнергии остались котельные СМП-6 котлов, котельная ОВ-4 котла. Без отопления остались 89 жилых домов, где проживают 2300 человек, детский сад, школа. Общая протяженность трассы 8 км, котельные топятся дровами, система отопления на подтеке, диаметр трубы 159 мм, температура воздуха -15-18 гр. 28.11.02. в 15ч. 45 мин. неисправность устранена, подана электроэнергия на все объекты. Ущерб – 3362,6 тыс. руб. Относительный ущерб к МРОТ составляет 7472. Согласно таблицы 9, класс аварии определяется по температурному режиму, который находится в пределах $20 > x_2 > 12$. Так как авария устранена в течение одних суток, определяется незначительной тяжестью последствий аварии относительно потребителей, не допущено замораживания теплотрассы, наружная температура была ниже комфортной, но выше критической отказ можно отнести к АС местного уровня. Хотя относительный материальный ущерб значительный, однако, незначительным является социальная часть ущерба.

2. Характерным примером значительной аварии является отказ котла в 27 ноября 2002 года в поселке Кысыл-Сыр. В 18 часов из-за неисправности фотореле остановился паровой котел котельной №1, отапливающий спутник водовода, который снабжает водой 3 котельные. В результате аварии 2 водовода и 2 спутника

длинной 300 метров были разморожены. Снабжение котельных водой было обеспечено из скважины 4-мя водовозными машинами. 29 ноября котел был восстановлен и запущен в работу. 29 и 30 ноября был отогрет и запущен в работу 1 водовод. 1 декабря велись восстановительные работы на 2 водоводе. Котельные №№1;2;3; отапливают 937 квартир, где проживают 1200 человек, температура в квартирах 6-12 °С. Температура наружного воздуха -43°С. Ущерб - 5038,5 тыс. руб. Относительный ущерб к МРОТ составил 11196. Аварийная ситуация в этом случае представляет собой АС территориального уровня, так как разморожены водоводы, в результате аварии снабжение теплом не остановлено, но температура в домах понизилась ниже критического значения, качество жизни населения не обеспечено, теплоснабжение восстановилось в течение трех суток. Объем восстановительных работ значительный и восстановление возможно с участием территориальных сил.

Авария, происшедшая в поселке Депутатский 2 февраля 2001 года, по времени восстановления и наличию эвакуации населения 3698 человек, относится к АС территориального уровня. При проведении сварочных работ возник пожар на ДЭС, огнем был уничтожен силовой кабель и все одиннадцать дизель генераторов. Электроснабжение поселка было прекращено. Была остановлена центральная котельная, обеспечивающая теплом 26 жилых домов (1539 квартир, 3698 человек, в том числе 1208 детей) и 33 объекта производственного и соцкультбыта. Население было эвакуировано в соседние населённые пункты и в г. Якутск. Ущерб составил более 40000 тыс. руб. относительный ущерб к МРОТ равняется 133333. Восстановление возможно только при участии региональных сил. Отказ системы энергоснабжения в этом случае можно отнести к чрезвычайной ситуации регионального уровня Относительный ущерб равный $1,3 \cdot 10^5$ находится в одном порядке с критериальным значением, но несколько меньше. Таким образом, данная АС относится к АС регионального уровня.

В таблице 10 приведены относительные величины ущербов, вычисленные по данным описаний АС. Ущербы включают только материальные потери, а социальные потери потребителей не учитываются. Полученные данные находятся в

интервалах величин относительных ущербов, приведенных в таблице 9. Отсутствующие данные устанавливаются по таблице 9.

Таблица 10 - Описание ущерба при авариях за 2002 год

№	Дата и место аварии	Время восстановления, час	Темпертурный режим в зданиях, °С	Ущерб относительно к МРОТ	Число людей с нарушенными условиями жизни, чел.	Наличие эвакуации, да/нет	Вид АС
1	27.11.02 поселок Солнечный	Менее суток	15-18	7472	2300	Нет	1
2	27.11.02 поселок КысылСыр	Три суток	6-12	11196	1200	Нет	2
3	2.02.01 поселок Депутатский	Около месяца	Ниже нуля	133333	3698	Эвакуация	3
4	29.12.03 город Верхоянск	31 суток	Больше 14	158,317	0	Нет	1
5	31.12.03 п. Сайылык,	15 суток	Ниже 0	416,667	0	Нет	2
6	29.12.1998 п.Тополиное	Нет данных	Ниже 0	Нет данных	1058	Эвакуация	3

При прогнозировании последствий АС с целью обоснования превентивных мероприятий по снижению ущербов от АС используется метод макро моделирования. Уровни последствий АС оцениваются по обобщенным осредненным величинам показателей по таблице 9. Критерии классов АС децентрализованных СЭ Севера приведены в таблице 11. Для целей прогнозирования безопасности системы энергетики время восстановления энергоснабжения, материальную часть ущерба и число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности приближенно можно принять как максимально усредненные для каждого вида АС. 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 таблице 11 устанавливается вид возможного аварийного состояния при АС;
- по таблице 11 устанавливаются основные параметры возможного ущерба.

Таблица 11 - Обобщенные показатели и критерии по классам аварийного состояния для децентрализованной СЭ на Севере

Параметр	Аварии чрезвычайного характера		
	местные	территориальные	региональные
Время восстановления, час	24	72	30 дней
Ущерб относительно к МРОТ	$5 \cdot 10^3$	$5 \cdot 10^5$	$5 \cdot 10^6$
Число людей с нарушенными условиями жизнедеятельности, чел.	До 300	Более 300	Более 500

4.3 Алгоритм оценки риска децентрализованных систем энергоснабжения

В разработанной методике оценки качества функционирования системы энергетики Севера повышение безопасности сложного технического объекта проводится управлением величиной риска. Условием эффективности является минимум приведенных затрат [52, 91]:

$$\sum Z_i \rightarrow \min . \quad (4.1)$$

Приведенные затраты определяются как сумма общих затрат на обеспечение безопасности и риска от возможной аварии. Общая схема методики оценки безопасности децентрализованной системы энергетики заключается в оценке безопасности СЭ управлением риска системы. Для того чтобы величина риска была наименьшей, нужно добиться снижения величины ущербов, т.е. повысить безопасность системы резервированием ее элементов. Управление риском проводится минимизацией суммы затрат на мероприятия по снижению риска и на возможный ущерб при данном уровне риска по условию:

$$\sum (Z_{MCP} + R) \rightarrow \min \quad (4.2)$$

Величина риска как прогнозируемый ущерб определяется как произведение величины вероятности отказа системы на возможный ущерб при реализации неблагоприятного события:

$$R = Q_f \cdot Y. \quad (4.3)$$

Для оценки безопасности системы энергетики северных территорий по предложенному алгоритму необходимо знание количественных характеристик вероятности отказа системы и ущерба при реализации неблагоприятного события. Для каждого конкретного объекта составляются своя методика расчета риска. В данной работе объектом исследования является децентрализованная система энергоснабжения населенных пунктов, расположенных на территории Крайнего Севера. Выше разработана и предложена методика определения каждого из двух показателей риска.

Алгоритм методики оценки безопасности заключается в следующем:

1. анализ существующего состояния СЭ;
2. формирование возможных сценариев развития аварии и составление модели надежности;
3. расчет надежности;
4. определение ущерба;
5. оценка риска;
6. выбор варианта развития 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.

По описанному алгоритму оцениваются результаты расчета надежности системы по данным надежности составляющих систему элементов. Из рассмотренных вариантов резервирования принимаются те наборы, для которых затраты будут минимальными. Для оценки безопасности системы энергетики Севера по

предложенному алгоритму необходимо знание количественных характеристик вероятности отказа системы и ущерба при реализации неблагоприятного события.

Установление надежности системы энергетики проводится как определение вероятности наступления неблагоприятных событий. Вероятность отказа системы подачи теплоэнергии определяется по методике, принятой на основе метода дерева событий (глава 3).

Установление надежности системы энергетики проводится как определение вероятности наступления неблагоприятных событий. Вероятность отказа системы подачи теплоэнергии определяется по методике, принятой на основе метода дерева событий. На рисунке 19 приведено дерево события, состоящее из семи уровней. На дереве событий имеются 13 возможных исходов, ветвей. Одно из них соответствует нормальному функционированию системы энергетики с вероятностью $P^{(1)}$. Шесть возможных исходов приводят к полной остановке подачи тепла, шесть исходов приводят к ограничению подачи тепла. Суммировав все исходы событий, приводящих к авариям (3.6), получим вероятность неблагоприятного события. Вероятность событий, приводящих к полной остановке подачи тепла:

$$Q_{\text{ост}} = B_2 + B_4 + B_6 + B_8 + B_{10} + B_{13}. \quad (4.4)$$

Вероятность событий, приводящих к ограничению подачи тепла:

$$Q_{\text{огр}} = B_3 + B_5 + B_7 + B_9 + B_{11} + B_{12}. \quad (4.5)$$

Множество конечного состояния составляется на основе анализа описания аварий. К ним относятся: недоотпуск тепловой энергии, замерзание теплопровода, полное прекращение подачи тепловой энергии, замерзание зданий. Значимость и отличия видов конечного состояния определяется величиной ущерба. Устанавливается три класса состояний по последствиям: незначительные, значительные и высокие. Для каждого двух последствий отказов системы энергоснабжения определяются возможные величины ущербов. Аварии в системе энергетики сопровождаются с различной тяжестью последствий (таблица 11): незначительной, значительной и высокой. Если ограничение подачи тепла сопровождается незначи-

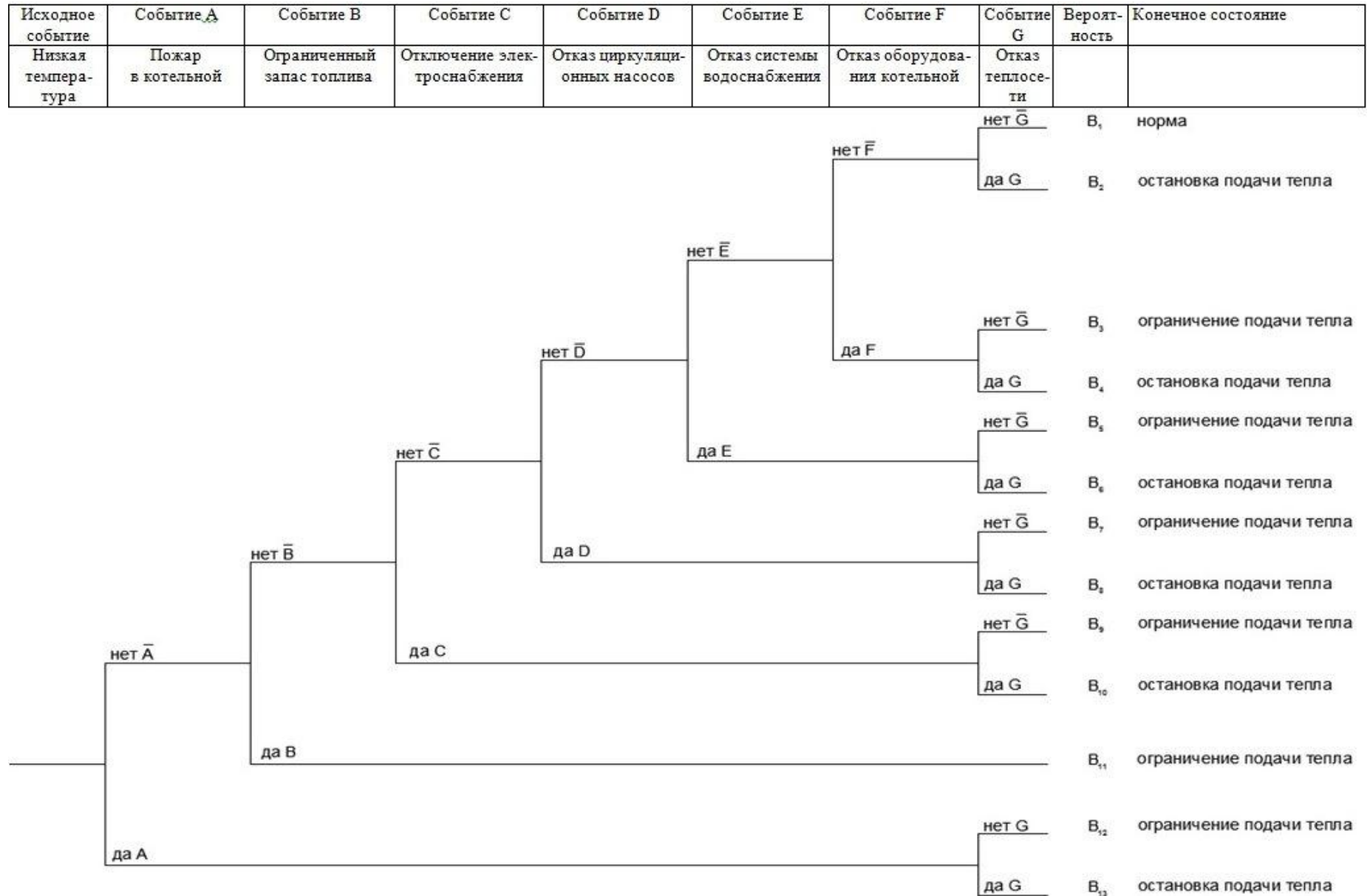


Рисунок 19 - Последствия АС в энергоснабжении децентрализованной СЭ

тельными последствиями, то при остановке подачи тепла имеют место или значительная или высокая степень тяжести аварий. Величина ущерба для каждого класса АС определяется по методике, приведенной в параграфе 4.2., согласно таблицы 11. По методике дерева событий для каждого возможного исхода рассчитаны вероятностные характеристики по зависимостям (3.13), по установленным последствиям определены качественные уровни тяжести отказов, для каждого класса отказов из таблицы 11 выбраны граничные значения относительного материального ущерба, времени восстановления и числа людей с нарушенными условиями жизнедеятельности.

4.4. Прогнозирование риска аварийных ситуаций

Система децентрализованного энергоснабжения состоит из подсистем электроснабжения, топливоснабжения, водоснабжения, теплоснабжения, транспортировки тепла. В свою очередь каждая подсистема состоит из множества структурных подсистем и элементов. Как показано в описаниях аварий, причина аварии может находиться в любой подсистеме. Авария распространяется каскадом, выход одного элемента приводит к отказу других подсистем (таблица 2). Значительный ущерб определяется наличием низких температур и размораживанием теплотрассы (таблица 3). Если климатический фактор невозможно устранить, то надежность теплотрассы - фактор управляемый. В работе проведение поэлементного анализа надежности подсистем не ставилась. Методика определения риска разработана на базе статистических данных аварийности функциональных элементов системы энергоснабжения в условиях севера. В качестве примера рассмотрим использование предложенной методики при отказе системы транспортировки тепла. По данным вероятности отказов СЭ (глава 3) проводится расчет надежности системы энергоснабжения по зависимостям (4.4) и (4.5). Согласно таблицы 9 принимаем осредненные значения ущербов:

$$Y_1 = 5 \cdot 10^3 \cdot \text{МРОТ}; Y_2 = 5 \cdot 10^5 \cdot \text{МРОТ}; Y_3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \text{МРОТ}.$$

Риск событий, приводящих к ограничению подачи тепла, равен:

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

Риск событий, приводящих к полной остановке подачи тепла равен:

Для значительных последствий:

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

При высоких потерях с эвакуацией:

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

На каждой котельной необходимо провести мероприятия по повышению безопасности с затратами в сумме равной риску событий. В итоге можно определить величину финансовых ресурсов необходимых для снижения аварийных рисков СЭ на территориях по РС(Я).

Рассмотрим пути повышения безопасности системы энергоснабжения путем резервирования. Для примера рассмотрим отказ одного из элементов системы – насоса. Вероятность отказа \bar{Q} по причине отказа циркуляционного насоса равна 0,0013, в случае одного насоса вероятность безотказной работы равна 0,99865, вероятность безотказной работы в случае наличия двух насосов равна 0,999982, вероятность отказа равна 0,000018.

Прогнозирование риска АС - риск событий, приводящих к ограничению подачи тепла, равен:

$$R_{2,пр} = Q_{\text{огр}2} \cdot Y_1 = 0,0116 \cdot 5 \cdot 10^3 = 58 \cdot \text{МРОТ}$$

Безопасность системы энергоснабжения по событиям, приводящим к ограничению тепла, повышается на 10%.

В экспертном порядке можно установить, что надежность теплотрассы зависит от длины теплопровода, наличия системы водоспуска, качества теплоизоляции, организации аварийных работ, автоматизации системы сигнализации, наличия повреждений и т.д. Вклад каждого фактора в несвоевременном устранении отказа оценить затруднительно.

При планировании превентивных работ по повышению надежности систем, например, путем резервирования, величина риска снижается за счет понижения

вероятности отказа системы энергоснабжения. Эти мероприятия также позволяют снизить класс тяжести отказов, что приводит уменьшению возможных значений ущербов. С целью моделирования ущерба при авариях рассмотрим пример одной аварии. В п. Сангар по причине отсутствия воды были заморожены: водовод (400 метров), 84 объекта жилого фонда, 2200 метров теплотрассы. Материальный ущерб - 8000 тыс. руб. Как видно из описания аварии, температура в домах был ниже нуля, ущерб значительный, класс тяжести относится ко второму. Рассмотрим сценарий, когда при своевременном спуске воды из теплотрассы не было бы разморожена теплотрасса, что снизило бы ущерб. Относительный обобщенный ущерб для второго класса тяжести принимается $5 \cdot 10^5$, а первого - $5 \cdot 10^3$.

Прогнозирование АС в системах инженерного обеспечения зданий позволит целенаправленно вложить финансовые и материальные ресурсы на наиболее опасные объекты и участки, определить направление работ по реконструкции и реновации систем энергоснабжения. Задача выбора превентивных мер по снижению риска, определение потребных ресурсов, запасов решается моделированием всех возможных АС.

Основные выводы и результаты работы

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. При значительных социальных ущербах 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 АС построена вероятностная модель функционирования децентрализованной СЭ. Предложенная методика позволяет определить вероятности аварийного состояния ЭС, выделить возмущения, которые могут привести к снижению качества функционирования системы. Показано, что наиболее «слабым звеном» в энергетических системах и комплексах является подсистема транспортировки тепла.

4. Разработана укрупнённая методика определения усреднённого удельного социально-экономического ущерба на основе классификации 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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акимов В.А., Лапин В.Л., Попов В.М., Пучков В.А., Томанов В. И., Фалеев М. И. Надежность технических систем и техногенный риск. — М.: ЗАО ФИД «Деловой экспресс», 2002. 368 с.
2. Акимов В.А., Потапов Б.В., Радаев Н.Н. Статистический метод прогноза вероятностей масштабных чрезвычайных ситуаций // Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. 1998. № 8. С. 51-62.
3. Антонов Г.Н., Черкесов Г.П., Криворучий Л.Д. и др. Методы и модели исследования живучести систем энергетики. Новосибирск: Наука, 1990. 285 с.
4. Баласс К.А., Егоров В.Е., Тращенко С.В, Смирнов В.Д. О безопасности Электроэнергетики в XXI веке. Вестник Псковского государственного университета. Серия: Экономические и технические науки, 2012. №1. С. 248-254.
5. Безопасность Республики Саха (Якутия): социальные, экономические и техногенные проблемы / под ред. В.Ю. Фридовского, В.А. Прохорова. Новосибирск: Наука, 2008. 296 с.
6. Безопасность России. Анализ рисков и управление безопасностью. Методические рекомендации. М.: МГОФ «Знание», 2008. 528 с.
7. 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.
8. Бушуев В.В. Энергетическая безопасность России / Бушуев В.В. и др. - Новосибирск: Наука, 1998. 301 с.
9. Васин В.П., Скопинцев В.А. Проблемы промышленной безопасности объектов энергетики // Известия Академии наук. Энергетика, 1994, №5. С.3-17.
10. Владимиров В.А., Измалков В.И., Измалков А.В. Оценка риска и управление техногенной безопасностью. М.: ФИД «Деловой экспресс», 2002. 184 с.

11. Волков Г.А. Оптимизация надежности электро-энергетических систем. М.: Наука, 1986. 117 с.
12. Воропай Н.И., Стенников В.А., Барахтенко Е.А. Интегрированные энергетические системы: вызовы, тенденции, идеология // Проблемы прогнозирования, 2017. - №5 (164). С. 39-49.
13. Гаврилова М.К. Климат холодных регионов Земли: учебное пособие. – Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. 206 с.
14. ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Изд. стандартов, 2013. С. 16.
15. ГОСТ 27.002-83. Надежность в технике. Термины и определения. — М.: Изд-во стандартов, 1984, с. 18.
16. ГОСТ 27.310-95. Надежность в технике. Анализ видов, последствий и критических отказов. Основные положения.
17. ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1990. 38 с.
18. ГОСТ Р 51901-2002. Менеджмент риска. Анализ риска технологических систем.
19. ГОСТ Р 54142-2010. Менеджмент рисков. Руководство по применению организационных мер безопасности и оценки рисков. Методология построения универсального дерева событий.
20. Голубчиков С.Н. Энергетика Севера: проблемы и пути их решения // Энергия. – 2002. - №11. –С. 35-39.
21. Гражданкин А.И., Дегтярев Д.В., Лисанов М.В, Печеркин А.С. Основные показатели риска аварии в терминах теории вероятностей // Безопасность труда в промышленности. – 2002. – № 7. С.35-39.
22. Григорьев Р.С., Ларионов В.П., Уржумцев Ю.С. Методы повышения работоспособности техники в северном исполнении. -Новосибирск: Наука. Сиб. Отделение, 1967. 252 с.
23. Диллон Б., Сингх Ч. Инженерные методы обеспечения надежности систем. – М.: Мир, 1984. – 318 с.

24. Дружинин Г.В. О количественных показателях безопасности функционирования технологических систем // Надежность и контроль качества. – 1993. - №5. – С. 3-13.
25. Дубинин В.С. Сопоставление систем центрального и децентрализованного энергоснабжения в современных условиях России (часть 1) // Промышленная энергетика, 2005. - №9. - С. 7-12.
26. Дубицкий М.А. Надежность энергоснабжения и безопасность систем энергетики // Вестник ИрГТУ. – 2013. – №9. – С. 211-216.
27. Дубицкий М.А., Снопкова Н.Ю. О понятиях «безопасность» и их соотношении // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. №1 (108). С. 69-75.
28. Дулесов А.С., Дулесова Н.В., Карандеев Д.Ю. Показатель разграничения уровня надежности технической системы по качественному признаку: энтропийный подход // Фундаментальные исследования. 2016. №2. С. 477-481.
29. Зачесов В.П., Филоненко В.Г. Транспорт Якутии: проблема материально-технического обеспечения. – Новосибирск: Сибирское соглашение, 2000. - 316 с.
30. Журина В.И., Галушко Е.Ф. Оценка схем теплоснабжения с учетом рыночных отношений // Теплоэнергетика. - 1992. № 1. - С. 25-28.
31. Иванова И.Ю., Тугузова Т.Ф., Попов С.П., Петров Н.А. Малая энергетика Севера: Проблемы и пути решения. – Новосибирск: Наука, 2002. – 188 с.
32. Инструкция по расследованию и учету технологических нарушений в работе энергосистем, электростанций, котельных электрических и тепловых сетей. М.: Энергосервис, 2001. - 12 с.
33. Измалков А.В., Бодриков О.В. Методические основы управления риском и безопасностью населения и территорий / Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях. – 1997. – №1. – С. 48-63.
34. 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.

35. Китушин В.Г. и другие. Методика оценки ущерба от нарушения электроснабжения / Изв. вузов. Энергетика, 1990. - №8. С. 9-13.

36. Киушкина В.Р. Специфика анализа энергетической безопасности автономных систем электроснабжения Севера России // Энергетическая политика. 2016. №5. С.52-62.

37. Кулагин В.А., Москвичев В.В., Махутов Н.А., Маркович Д.М., Шикин Ю.И. Физическое и математическое моделирование в области гидродинамики больших скоростей на экспериментальной базе Красноярской ГЭС // Вестник Российской академии наук. 2016. Т. 86. №11. С. 978-990.

38. Кучей В. А. Повышение надежности теплоснабжающих систем на базе совершенствования процессов восстановления теплоснабжения при отказах теплопроводов // Изв. АН СССР. Энергетика и трансп. 1988. № 3. С. 38—45.

39. Кылатчанов А.П. Вентиляционные процессы в зданиях. – Новосибирск: Наука.Сибирское предприятие РАН, 1990. – 224 с.

40. Ларионов В.П., Петров Н.А., Сафронов А.Ф., Слепцов О.И. Роль топливно-энергетических ресурсов РС (Я) в энергетической кооперации России и стран Северо-Восточной Азии / Энергетика Северо-Востока: состояние, проблемы и перспективы развития: Сб. докл. и науч. ст. / Отв. ред. Н.А. Петров; Ин-т физ.-тех. проблем Севера СО РАН. – Якутск: ЯФ ГУ Изд-во СО РАН, 2004. - С. 31-43.

41. Лепихин А.М., Махутов Н.А., Москвичев В.В., Черняев А.П. Вероятностный риск-анализ конструкций технических систем.— Новосибирск: Наука, 2003. — 174 с.

42. Лесных В.В. Анализ риска и механизмов возмещения ущерба от аварий на объектах энергетики. – Новосибирск: Наука, 1999. – 251 с.

43. Лукутин Б.В., Климова Г.Н., Обухов С.Г., Шутов Е.А., Парников Н.М. Энергетическая эффективность комплекса децентрализованного

электроснабжения Республики Саха (Якутия) // Известия вузов. Проблемы энергетики, 2008. – т.1 - №7-8/1. – с.124-130.

44. Махутов Н.А. Прочность и безопасность: фундаментальные и прикладные исследования / Н.А.Махутов. – Новосибирск: Наука, 2008. – 528 с.

45. Махутов Н.А., Берман А.Ф., Николайчук О.А. Управление риском сложных технологических комплексов на основе самоорганизации. В. Книге: Управление развитием крупномасштабных систем MLCД 2015. Материалы Восьмой международной конференции в 2-х томах. Институт проблем управления им. В.А. Трапезникова Российской академии наук. Под общей редакцией С.Н. Васильева, А.Д. Цвиркун. 2015. С. 104-113.

46. Махутов Н.А., Петров В.П., Ахметханов Р.С, Резников Д.О. и др. Безопасность России. Анализ риска и проблемы безопасности. Часть 2. Безопасность гражданского и оборонного комплексов и управление рисков.— М.: МГФ «Знание», 2006. — 434 с.

47. Махутов Н.А., Котоусов А.Г. Принципы повышения безопасности сложных технических систем / Защита металлов, 1996. Т.32. - №4. - С. 346-351.

48. Мелентьев Л.А. Системные исследования в энергетике. Элементы теории, направления развития. - М.: Наука, 1979. -415 с.

49. Методика оценки риска аварий на опасных производственных объектах нефтегазоперерабатывающей, нефте- и газохимической промышленности (утв. Приказом Федеральной службы по экономическому, технологическому и атомному надзору от 27.12.2013 г. №6460).

50. Монахов Г.В., Красовский Б.М. Количественная оценка надежности существующих и перспективных систем теплоснабжения // Изв. АН СССР. Энергетика и трансп. 1988. № 3. С. 23—27.

51. Москвичев В.В., Лепихин А.М., Доронин С.В. Надежность, живучесть и безопасность сложных технических систем // Вычислительные технологии, 2009. - №6. С. 58-70.

52. Надежность и эффективность в технике: справочник. Т.1. –М.: Машиностроение, 1986. – 223 с.

53. 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.
54. Надежность систем энергетики. Терминология / Под ред. Ю.Н. Руденко. – М.: Наука, 1980. – вып. 95. – 43 с.
55. Надежность топливо- и энергоснабжения и живучесть систем энергетики регионов России/ под ред. Н.И. Воропая, А.И. Татаркина; Л.Л. Богатырев, А.В. Бочегов, Н.И. Воропай и др. – Екатеринбург: изд-во Урал. Ун-та, 2003. – 392 с.
56. Недосекин А. О., Смирнов А. В. Вероятностный анализ живучести системы теплоснабжения// Энергетическое строительство, 1992. № 11. С. 24—28.
57. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 24. Якутская АССР. Книга 1. Л.: Гидромеоиздат, 1989. — 608 с.
58. Научно-прикладной справочник по климату СССР. Выпуск 24. Якутская АССР. Книга 2. Л.: Гидромеоиздат, 1989. — 387 с.
59. Ноев В.Н. Проблемы надежности электро- и теплоснабжения в РС(Я) / Энергетика северо-востока: состояние, проблемы и перспективы развития. Якутск: ЯФ ГУ «Изд-во СО РАН», 2004. С. 95-105.
60. Нормы технологического проектирования тепловых электростанций. М.: Минэнерго СССР, 1981. 122 с.
61. Нотенко С.Н., Ройтман А.Г., Сокова Е.Я., Стражников А.М., Шарлыгина К.А., Шейбнер А.А., Шумилов М.С. Техническая эксплуатация жилых зданий. – М.: Высшая школа, 2000. – 429с.
62. Обеспечение энергетической безопасности России: выбор приоритетов / С.М. Сендеров, В.И. Рабчук, Н.И. Пяткова, С.В. Воробьев; отв. ред. С.М. Сендеров. Рос. акад. наук, Сиб. отд-ние, Ин-т систем энергетики им. Л.А. Мелентьева. – Новосибирск: Наука, 2017 – 116 с.
63. Овсейчук В.Л., Непомнящий В.Л. Нормирование надежности и качества электроснабжения потребителей // Инноватика и экспертиза: научные труды, 2016. - №1 (16). - С. 175-185.

64. Октябрьский Р.Д. Управление риском в системах и объектах жизнеобеспечения городской застройки. Учебное пособие. М. ГАСИС, 2003. 106 с.
65. Острейковский В.А. Теория техногенного риска: математические методы и модели. – Сургут: ИЦ СурГУ, 2013. 320 с.
66. Отраслевые и региональные проблема формирования энергетической безопасности / Под ред. А.А.Куклина, А.Л. Мызина; Куклин А.А., Мызин А.Л., Богатырев Л.Л., Пыхов П.А. и др. – Екатеринбург: Институт экономики УрОРАН, 2008. – 384 с.
67. Парников Н.М. Повышение энергетической эффективности комплексов децентрализованного электроснабжения на примере Республики Саха (Якутия): автореф. дис. канд. наук. Томск. полит. институт (ТПУ), Томск, 2009.
68. Петров Н.А., Алексеев Г.Ф. и др. Энергетическая стратегия Республики Саха (Якутия) на период до 2030 года / Правительство Респ. Саха (Якутия). – Якутск; Иркутск: Медиа-холдинг “Якутия”, и др.; 2010. – 328 с.
69. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. Практикум. – СПб.: БХВ-Петербург, 2006. -560 с.
70. Папков Б.В. Требования потребителей к уровню энергетической безопасности и надежности. Экономическая безопасность России: проблемы и перспективы. III международная научно-практическая конференция, 2014. - С. 328-335.
71. Папкина М.Д., Папков Б.В. Оценка технологических рисков в электроэнергетике // Приволжский научный журнал, 2015. №3. С.218-225.
72. Попырин Л.С. Безопасность объектов теплоэнергетики / Теплоэнергетика, 1995, №9. - С .20-26.
73. Попырин Л.С. Исследование надежности и живучести систем централизованного теплоснабжения городов / Известия Академии наук. Энергетика, 1995, № 6. - С. 63-70.

74. Попырин Л.С. Природно-техногенные аварии в системах теплоснабжения / Вестник российской академии наук, 2000, том 70, № 7. С. 604-610.
75. Попырин Л.С. Проблема надежности систем теплоснабжения // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт 1988. № 3. - С. 4—14.
76. Попырин Л.С. Инженерная методика расчета и экономического обоснования структурной надежности источников теплоты / Теплоэнергетика. 1992. № 12. - С. 12—19.
77. Попырин Л.С. Информативность показателей надежности энергетических установок // Теплоэнергетика, 1994. № 7. С. 39—43.
78. Попырин Л.С., Зубец А.П., Дильман М.Д. Живучесть систем теплоснабжения // Изв. РАН. Энергетика, 1995. № 1. - С. 34—46.
79. Постановление Правительства РФ от 21.05.2007 г. №304 (ред. от 17.05.2011 г.) «О классификации чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера».
80. Прицкер В.М. К определению оптимальной характеристики надежности цилиндрического резервуара / Строительная механика и расчет сооружений, 1971. №4. – С. 61-64.
81. Промышленное производство в республике Саха (Якутия). 2013: Стат. сб. / Саха (Якутия) стат – Якутск, 2013. – 229 с.
82. Прохоров В.А. Оценка параметров безопасности эксплуатации нефтехранилищ в условиях Севера. – М.: ООО «Недра-Бизнесцентр», 1999. – 142 с.
83. 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.
84. Прохоров Д.В. Энергетическая безопасность населенных пунктов в условиях Крайнего Севера // Энергобезопасность и энергосбережение, - 2014. - №3. - С. 5-7.

85. Прохоров Д.В. Моделирование надежности децентрализованных систем энергетики Севера // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций, 2014 №3, с. 54-61.
86. Прохоров Д.В., Прохоров В.А. Особенности анализа риска систем энергетики Севера // Надежность и безопасность энергетики, 2014 №4, С. 2-6.
87. РД МУ 50-690-89. Надежность в технике. Методы оценки показателей надежности по экспериментальным данным— М.: Изд-во стандартов, 1990, 136 с.
88. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов (Утверждено Госгортехнадзором России Постановлением от 10.07.2001 №30), 2001. 18 с.
89. РД 03-496-02. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах (Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 29.10.02 N 63), 2002. 12 с.
90. РД 03-418-01. Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. // Серия 03. Нормативные документы межотраслевого применения по вопросам промышленной безопасности и охраны недр. Выпуск 10. М.: ГУП "НТЦ ПБ" Госгортехнадзора России, 2001. – 60 с.
91. Розанов М. Н. Надежность электроэнергетических систем. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 200 с.
92. Руденко Ю.Н., Ушаков И.А. Надежность систем энергетики. - М.: Наука, 1989. 328 с.
93. Руденко Ю.Н., Чельцов М.Б. Надежность и резервирование в электроэнергетических системах. Новосибирск: Наука, 1974. – 263 с.
94. Рыльский В.А., Антоненко Г.В. Основные проблемы энергоснабжения регионов Севера. Проблемы Севера. – М.: Наука, 1986. – В. 22. –С. 86-93.
95. Рябинин И.А. Надежность и безопасность структурно-сложных систем. – СПб.: Политехника, 2000. – 248 с.
96. Савельев В.А., Батаева В.В. Исследование воздействия угроз энергетической безопасности на электроэнергетическую систему региона на основе анализа рисков. Вестник ИГЭУ, в. 5, 2017. С. 19-26.

97. Свод Правил. Тепловые сети. СП 124.13330.2012. М. 2012. -78 с.
98. Сеннова Е.В., Сидлер В.Г. Математическое моделирование и оптимизация развивающихся теплоснабжающих систем. Новосибирск: Наука, 1987. 222 с.
99. Сеннова Е.В., Мирошниченко В. В. Исследование надежности тепловых сетей // Изв. АН СССР. Энергетика и трансп. 1988. № 3. С. 14—23.
100. Системные исследования проблем энергетики / Л.С. Беляева, Б.Г. Санеев, С.П. Филиппов и др.; Под ред. Н.И.Воропая. – Новосибирск: Наука, 2000. – 558 с.
101. Старостина Л.В. Сравнение показателей развития топливно-энергетического комплекса Якутии и других северных территорий // Промышленная энергетика, 2013. - №10. - С. 21-26.
102. Стенников В.А. Распределенная генерация энергии: миссия, ситуация, возможности // Энергия: экономика, техника, экология, - 2016. - №1. - С. 2-10.
103. Строительные нормы и правила. СНиП. 2.04.07-86. Тепловые сети. М.: ЦИТП Госстроя СССР, 1986. 48 с.
104. Строительные нормы и правила. СНиП 11-35-76. Котельные установки. М.: Стройиздат, 1977. 48 с.
105. Сухарев М.Г., Ставровский Е.Р. Резервирование систем магистральных трубопроводов. – М.: Недра, 1987. – 168 с.
106. Схема и программа развития электроэнергетики Республики Саха (Якутия) на 2017-2021 годы.
107. Телиженко А.М., Семенко Б.А. Определение размеров компенсации вреда здоровью населения в связи с загрязнением окружающей среды / Труды Первой Всероссийской конференции «Теория и практика экологического страхования». – М., 1995. - С. 110-119.
108. Теплоснабжение малых населенных пунктов/ В.Н. Братенков, П.А. Хаванов, Л.Я. Вэскер.- М.: Стройиздат, 1988. — 223 с.
109. Технический отчет ОАО Сахаэнерго за 2016 год.

110. Тимашев С.А. Надежность больших механических систем. – М.: Наука, 1982. – 183 с.
111. Топливо-энергетический баланс Республики Саха (Якутия), ч. I. / Мин-во экон. развития Респ. Саха (Якутия), ин-т физ.-техн. проблем Севера СО РАН: [науч. рук. и отв. исполн. д.т.н. Н.А. Петров]. – Якутск: Сахапоилграфиздат. – 2005. – 160 с.
112. Топливо-энергетический баланс Республики Саха (Якутия), ч. II. / Мин-во экон. развития Респ. Саха (Якутия), [науч. рук. и отв. исполн. д.т.н. Петров Н.А.] – Якутск: Сайдам, 2006. – 280 с.
113. Чудинов Г.М. Электроэнергетика Якутской АССР и некоторые вопросы ее надежности / Надежность электроснабжения в условиях Севера. Якутск, изд. Якутского филиала СО АН СССР, 1977. - С.3-13.
114. Федорова Е.Н. Население Якутии. Прошлое и настоящее. – Новосибирск: Наука, 1998. – 206 с.
115. Харисов Г.Х. обоснование затрат, выделяемых на предотвращение гибели людей при несчастных случаях, авариях, катастрофах, стихийных бедствиях/ Проблемы безопасности при чрезвычайных ситуациях, 1993. Вып. 8. – С. 73.
116. Хохлов Н.В. Управление риском.— М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2001.— 239 с.
117. Хенли Э., Кумамото Х. Надежность технических систем и оценка риска. – М.: Машиностроение, 1984. – 528 с.
118. Швыряев А.А., Меньшиков В.В., Орехова Д.А., Сафонов В.С. Техногенные риски в регионе: анализ, оценка, управление / Управление природными техногенными рисками на уровне региона – Российский и международный опыт/ Сборник докладов 4-го Всероссийского семинара «Риск и страхование». – Иркутск: ИСЭМ СО РАН, 1999. – С. 84 – 113.
119. Элякова И.Д., Обеспечение электроэнергетической безопасности арктических территорий Республики Саха (Якутия) // Экономика и управление, 2015. - №11 (121). – С. 87-93.

120. Энергетическая безопасность России: проблемы и пути решения / Пяткова Н.И., Рабчук В.И., Сендеров С.М., Славин Г.Б., Чельцов М.Б. Новосибирск: СО РАН, 2011. 198 с.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ
ОЦЕНКА БЕЗОПАСНОСТИ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕ-
НИЯ В УСЛОВИЯХ СЕВЕРА

1. ОБЛАСТЬ ПРИМЕНЕНИЯ

1.1. Настоящие «Методические указания по оценке безопасности децентрализованных систем энергоснабжения в условиях Севера» (далее – Методические указания) устанавливают методические принципы, термины и понятия оценки безопасности.

1.2. Методические указания разработаны в соответствии с требованиями и в развитие следующих документов:

- Федеральный закон «О промышленной безопасности опасных производственных объектов» от 21.07.97 № 116-ФЗ (Собрание законодательства Российской Федерации, 1997, № 30, ст. 3588);

- ГОСТ Р 22.10.01-2001. Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Оценка ущерба. Термины и определения;

- ГОСТ 27.002-89. Надежность в технике. Основные понятия. Термины и определения. М.: Изд. стандартов, 1990. 38 с.;

- РД 03-418-01 Методические указания по проведению анализа риска опасных производственных объектов. Утверждено Госгортехнадзором России Постановлением от 10.07.2001 №30;

- Свод Правил. Тепловые сети. СП 124.13330.2012. М. 2012. -78 с.;

- ГОСТ 30494-2011. Здания жилые и общественные. Параметры микроклимата в помещениях. – М.: Изд. стандартов, 2013. С. 16.;

- РД 03-496-02 Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах. Утверждены постановлением Госгортехнадзора России от 29.10.02 N 63;

- СНиП 41-02-2003 «Тепловые сети». □М.: Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004;

- Постановление Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 27 декабря 2010 года № 175 «Об утверждении СанПиН 2.1.2.2645-10».

1.3. Методические указания предназначены для специалистов организаций, осуществляющих проектирование и эксплуатацию децентрализованных систем энергетики.

2. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ

В целях настоящего документа применяются следующие определения:

2.1. **Эффективность в энергетике** представляет собой способность постоянного поддержания оптимального энергоснабжения потребителей с минимальными затратами ресурсов и времени.

2.2. **Безопасность** - свойство объекта, состоящее в бесперебойном снабжении потребителей энергией требуемого качества и недопущение ситуаций, опасных для людей и окружающей среды.

2.3. **Надежность** - свойство объекта сохранять во времени в установленных пределах значения всех параметров, характеризующих способность объекта выполнять требуемые функции в заданных режимах и условиях применения, технического обслуживания, хранения и транспортирования.

2.4. **Живучесть** - свойство объекта, состоящее в его способности противостоять отказам обеспечивающих подсистем и сохранять ограниченную работоспособность при установленной системе технического обслуживания и ремонта.

2.5. **Работоспособное состояние** – состояние объекта, при котором значения всех параметров, характеризующих способность выполнить заданные функции соответствуют требованиям нормативно-технической и конструкционной документации.

2.6. **Нормирование надежности** – установление в нормативно-технической и конструкторской документации количественных и качественных требований надежности.

2.7. **Вероятность безотказной работы системы [P]**: Способность системы не допускать отказов, приводящих к падению температуры в отапливаемых помещениях жилых и общественных зданий ниже нормативных.

2.8. **Коэффициент готовности (качества) системы [K_r]**: Вероятность работоспособного состояния системы в произвольный момент времени поддерживать в отапливаемых помещениях расчетную внутреннюю температуру, кроме периодов снижения температуры, допускаемых нормативами.

2.9. **Отказ** – событие, заключающееся в нарушении работоспособного состояния объекта, после которого изделие перестает полностью или частично выполнять свои функции.

2.10. **Авария** – исход опасной ситуации, сопровождающаяся разрушением объекта.

2.11. **Анализ риска аварии** – процесс идентификации опасностей и оценки риска аварии на опасном производственном объекте для отдельных лиц или групп людей, имущества или окружающей природной среды.

2.12. **Риск аварии** – мера опасности, характеризующая возможность возникновения

аварии на опасном производственном объекте и тяжесть ее последствий. Характеризует тяжесть последствий (катастрофичность) реализации опасностей.

2.13. **Оценка риска аварии** – процесс, используемый для определения вероятности (или частоты) и степени тяжести последствий реализации опасностей аварий для здоровья человека, имущества и/или окружающей природной среды. Оценка риска включает анализ вероятности (или частоты), анализ последствий и их сочетания.

2.14. **Приемлемый риск аварии** – риск, уровень которого допустим и обоснован исходя из социально-экономических соображений. Риск эксплуатации объекта является приемлемым, если ради выгоды, получаемой от эксплуатации объекта, общество готово пойти на этот риск.

2.15. **Ожидаемый ущерб** – математическое ожидание величины ущерба от возможной аварии, за определенный период времени.

2.16. **Ущерб от аварии** — потери (убытки) в производственной и непроизводственной сфере жизнедеятельности человека, вред окружающей природной среде, нанесенные в результате аварии на опасном производственном объекте и исчисляемые в денежном эквиваленте.

3. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

3.1. Настоящие Методические указания устанавливают общие положения и рекомендации по порядку оценки риска от аварий в децентрализованных системах энергоснабжения населенных пунктов в условиях Севера.

3.2. Методические указания предназначены для использования инженерно-техническими работниками проектных организаций и энергоснабжающих предприятий, персоналом органов государственного энергетического надзора и органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации при проведении оценки безопасности систем энергоснабжения децентрализованных поселений.

3.3. Оценка риска от аварий на опасных производственных объектах является основой для:

- учета и регистрации аварий по единым экономическим показателям;
- оценки риска аварий на опасных производственных объектах;
- принятия обоснованных решений по обеспечению безопасности;
- анализа эффективности мероприятий, направленных на снижение размера ущерба от аварий.

3.4. Методические рекомендации можно использовать в качестве основы для разработки ведомственных методик оценки ущерба от аварий на опасных производственных объектах

различных отраслей промышленности.

4. СТРУКТУРА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

4.1. Функциональным назначением децентрализованной системы энергоснабжения является обеспечение изолированных населенных пунктов электроэнергией и тепловой энергией. В условиях Севера при продолжительной и холодной зиме потребность в тепле является жизнеобеспечивающим фактором.

4.2. Система энергоснабжения состоит из структурных (функциональных) элементов (подсистем). Система энергоснабжения на Крайнем Севере состоит из систем электроснабжения и теплоснабжения. Основными элементами системы электроснабжения являются система топливоснабжения, система генерации электроэнергии и система транспортировки электроэнергии, а теплоснабжения – система водоснабжения, система топливоснабжения, система выработки тепла и система транспортировки тепла.

4.3. Каждый из структурных элементов системы энергоснабжения состоит из элементов (котлы, турбины, теплообменники, насосы, трубопроводы и другое оборудование).

5. СВОЙСТВА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

5.1. Эффективность является общим комплексным свойством любого производства, в том числе и энергоснабжения, зависит не только от параметров технической системы, но и практически от всех факторов, включая экономические, финансовые и социальные.

5.2. Для децентрализованной системы энергоснабжения 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 систем центральных регионов. В условиях Севера свойство надежности не характеризует качество функционирования объекта.

5.3. Определяющим свойством децентрализованной системы энергоснабжения принимается безопасность, учитывающая взаимозависимость технической системы и окружающей среды, и характеризующая качество функционирования системы на стадии эксплуатации. Безопасность системы энергоснабжения должна обеспечиваться бесперебойным снабжением потребителей тепло- и электроэнергией в течение заданного периода, недопущение опасных для людей и окружающей среды ситуаций.

5.4. Предметом исследования безопасности является процесс возникновения возмущений, реакция системы энергетики на возникшие возмущения, последствия для потребителей

энергии и способ устранения или компенсации нежелательных последствий.

5.5. Оценка безопасности включает анализ риска аварий системы энергоснабжения, что является составной частью управления промышленной безопасностью. Анализ риска заключается в систематическом использовании всей доступной информации для идентификации опасностей и оценки риска возможных нежелательных событий.

5.6. Интегральным показателем риска принимается риск, как вероятностный ущерб.

5.7. Обеспечение безопасности включает решение проблем надежности и живучести системы.

5.8. Надежность и живучесть характеризуют состояние функциональных элементов энергетической системы. Для оценки живучести системы используются такие же показатели, как и при надежности.

6. ПОКАЗАТЕЛИ ХАРАКТЕРИСТИК ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННЫХ СИСТЕМ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

6.1. Показатели безопасности системы энергоснабжения подразделяются на:

- общие – системные;
- частные - подсистем.

6.2. Общесистемным показателем безопасности децентрализованных систем энергоснабжения принимается риск, как вероятностный ущерб.

6.3. Частные показатели подсистем:

- показатели, характеризующие надежность электроснабжения источников тепла;
- показатели, характеризующие надежность водоснабжения источников тепла;
- показатели, характеризующие надежность топливоснабжения источников тепла;
- показатели, характеризующие соответствие тепловой мощности источников тепла и пропускной способности тепловых сетей расчетным тепловым нагрузкам потребителей;
- показатели, характеризующие уровень резервирования (K_p) источников тепла и элементов тепловой сети;
- показатели, характеризующие уровень технического состояния тепловых сетей;
- показатели, характеризующие интенсивность отказов тепловых сетей;
- показатели, характеризующие аварийный недоотпуск тепла потребителям;
- показатели, характеризующие количество жалоб потребителей тепла на нарушение качества теплоснабжения.

6.4. Величина риска как прогнозируемый ущерб определяется как произведение величины события на меру возможности его наступления:

$$R = Q_f \cdot Y \quad (1)$$

где Q_f – вероятность отказа; Y – ущерб от отказа.

6.5. Риск оценивается как приемлемый риск с учетом экономических возможностей региона.

6.6. В качестве частного критерия безопасности системы теплоснабжения принимается условие недопустимости уменьшения температуры воздуха в отапливаемых помещениях ниже критической:

$$t \geq t_{к2}. \quad (2)$$

Температурные условия устанавливают границы нормального функционирования и снижения уровня функционирования систем теплоснабжения, характеризуют выходные параметры системы. Они не показывают внутренние причины снижения безопасности системы энергоснабжения.

6.7. Время восстановления – это продолжительность восстановления работоспособного состояния объекта. Время восстановления равно сумме времен, затрачиваемых на отыскание и устранение отказа, а также на проведение необходимых отладок и проверок, чтобы убедиться в восстановлении работоспособности объекта.

7. ОТКАЗЫ В ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЕ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ И ИХ ПОСЛЕДСТВИЯ

7.1. Аварии в системе энергоснабжения приводят к нарушению ее функционирования и снижению качества жизни потребителей.

7.2. Отказы в энергетических системах сопровождаются комплексом негативных явлений, последствия которых носят экономический, социально-экономический и социальный характер. В условиях Севера аварии сопровождаются значительным ущербом.

7.3. Существуют два подхода определения экономического ущерба от отказов. Первый (микромоделирование) основан на последовательном подсчете всех потерь и затрат, являющихся следствием отказа. По своей сути этот подход не может быть применен в задачах прогнозирования. Применяется в области страхования ущерба при авариях. Все потери и затраты тщательно определяются после АС.

7.4. Второй (макромоделирование) подход основан на использовании удельных характеристик ущерба, определяемых с той или иной степенью приближения, отнесенных в пределах типа технологического производства. Макромоделирование ущерба применяется, когда последствия отключения потребителей известно ориентировочно, основывается на достаточно ограниченных данных, позволяет получить приближенные значения ущерба.

Макромоделирование ущерба применяется при обобщенных оценках.

7.5. Классификация ущербов проводится по признаку субъектов: ущерб самой энергетической системы, ущерб потребителей, ущерб смежных звеньев. Косвенные убытки, связанные со снижением прибыли, затрат от простоя на производстве, не учитываются.

7.6. В состав ущерба производственной части входят:

- потери ресурсов при отказах;
- затраты на уменьшение потерь ресурсов при отказах;
- затраты на компенсации негативных последствий отказов.

7.7. Социальный ущерб при отказах системы энергоснабжения на Севере заключается в увеличении заболеваемости, снижении уровня физического развития и общей продолжительности жизни, сокращении периода активной деятельности, ухудшении условий труда и отдыха населения, снижении возможности творческого развития личности.

8. ПОКАЗАТЕЛИ ТЯЖЕСТИ ОТКАЗА СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

8.1. За основные показатели качества функционирования системы энергоснабжения в условиях Севера принимаются совокупный ущерб, температурный режим помещений, время восстановления, количество людей с нарушенными условиями жизнедеятельности и пострадавших (эвакуированных).

8.2. Основным показателем тяжести отказов является совокупный ущерб.

8.3. Температура в здании характеризует состояние работоспособности системы энергоснабжения, качества жизнеобеспечения и является одним из характерных показателей тяжести отказа.

8.4. Среди показателей надежности технических систем наиболее важным для систем энергоснабжения является среднее время её восстановления.

8.5 Система теплоснабжения считается исполняющей свою основную функцию, если здоровью людей не наносится ущерб из-за нарушения снабжения потребителей теплом. Одним из показателей качества функционирования энергетической системы принимается число пострадавших людей. Чем больше число пострадавших людей, тем выше социальный ущерб и степень аварийного состояния.

8.6. Аварии сопровождаются эвакуацией населения в другие населенные пункты. В этом случае социальная часть ущерба значительно повышается.

9. КРИТЕРИИ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И КЛАССИФИКАЦИЯ ТЯЖЕСТИ ОТКАЗОВ

9.1. Аварии АС объектового уровня. К авариям 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.

9.2. Аварии АС территориального уровня. К авариям со значительной тяжестью последствий можно отнести аварии, 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 теплосети 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 более 300 человек, число пострадавших людей (эвакуация) более 50 человек.

9.3. Аварии АС регионального уровня. К авариям чрезвычайной или высокой тяжести последствий можно отнести аварии, приводящие к снижению качества жизни, промерзанию объектов жизнеобеспечения населения и эвакуации населения. Восстановление энергоснабжения возможно с участием региональных сил. Характеризуются значительным временем восстановления, выше 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 людей (эвакуация) более 100 человек.

10. ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ СИСТЕМЫ ЭНЕРГОСНАБЖЕНИЯ

10.1. Надежность теплоснабжения обеспечивается надежной работой всех элементов системы теплоснабжения, а также внешних, по отношению к системе теплоснабжения, систем

электро-, водо-, топливоснабжения источников тепловой энергии.

10.2. Для оценки надежности систем теплоснабжения необходимо использовать показатели надежности структурных элементов системы теплоснабжения и внешних систем электро-, водо-, топливоснабжения источников тепловой энергии.

10.3. Для определения количественных показателей надежности системы теплоснабжения применяется метод дерева событий (рисунок 1).

10.4. За исходное событие принимается событие «низкая температура». Отказ в системе теплоснабжения чрезвычайного характера имеет место при низкой температуре, и частота аварий повышается со снижением температуры наружного воздуха. За конечное событие принимается остановка подачи тепла, приводящая к промерзанию объектов жизнедеятельности.

10.4. Основные события, влияющие на протекание АС: пожар, ограниченный запас топлива, отключение электроснабжения, остановка циркуляционных насосов, отказ системы водоснабжения, отказ оборудования котельной и отказ теплосети.

10.5. Составленная причинно-следственная схема развития аварий 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.

10.6. Установление надежности системы энергетики проводится как определение вероятности наступления неблагоприятных событий. Вероятность отказа системы подачи теплоэнергии определяется по методике, принятой на основе метода дерева событий. Вероятность реализации конечного события данной последовательности равна произведению вероятностей отдельных событий этой последовательности. Имеется тринадцать различных вариантов несовместимых конечных событий.

$$\begin{aligned}
 B_1 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_F \cdot P_G; \\
 B_2 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot P_F \cdot Q_G; \\
 B_3 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot Q_F \cdot P_G; \\
 B_4 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot P_E \cdot Q_F \cdot Q_G; \\
 B_5 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot Q_E \cdot P_G; \\
 B_6 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot P_D \cdot Q_E \cdot Q_G; \\
 B_7 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot Q_D \cdot P_G; \\
 B_8 &= P_A \cdot P_B \cdot P_C \cdot Q_D \cdot Q_G; \\
 B_9 &= P_A \cdot P_B \cdot Q_C \cdot P_G; \\
 B_{10} &= P_A \cdot P_B \cdot Q_C \cdot Q_G; \\
 B_{11} &= P_A \cdot Q_B; \\
 B_{12} &= Q_A \cdot P_G; \\
 B_{13} &= Q_A \cdot Q_G.
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

10.7. Из 13-ти возможных исходов, ветвей одно из них соответствует нормальному функционированию системы энергетики с вероятностью V_1 . Шесть возможных исходов приводят к полной остановке подачи тепла, шесть исходов приводят к ограничению подачи тепла. Вероятность неблагоприятного события определяется как сумма всех исходов событий, приводящих к авариям.

10.8 Вероятность событий, приводящих к полной остановке подачи тепла:

$$Q_{\text{ост}} = V^{(2)} + V^{(4)} + V^{(6)} + V^{(8)} + V^{(10)} + V^{(13)}. \quad (4)$$

10.9. Вероятность событий, приводящих к ограничению подачи тепла:

$$Q_{\text{огр}} = V^{(3)} + V^{(5)} + V^{(7)} + V^{(9)} + V^{(11)} + V^{(12)}. \quad (5)$$

11. НАДЕЖНОСТЬ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

11.1. Способность проектируемых и действующих источников теплоты, тепловых сетей обеспечивать в течение заданного времени требуемые режимы, параметры и качество тепло-снабжения следует определять по трем показателям (**СП 124.13330.2012**): вероятности безотказной работы $[P]$, коэффициенту готовности $[K_r]$, живучести $[Ж]$.

11.2. Расчет показателей системы с учетом надежности должен производиться для каждого потребителя.

11.3. Минимально допустимые показатели вероятности безотказной работы следует принимать для:

- источника теплоты $P_{\text{ит}} = 0,97$;
- тепловых сетей $P_{\text{тс}} = 0,9$;
- потребителя теплоты $P_{\text{пт}} = 0,99$.

12. ОЦЕНКА РИСКА ДЕЦЕНТРАЛИЗОВАННОЙ СИСТЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ

12.1. Оценка риска АС проводится с учетом данных вероятности отказа и прогнозируемого ущерба.

12.2. Риск событий, приводящих к ограничению подачи тепла, равен:

$$R_1 = Q_{\text{огр}} \cdot Y_1. \quad (6)$$

12.3. Риск событий, приводящих к полной остановке подачи тепла для значительных последствий равен:

$$R_2 = Q_{\text{ост}} \cdot Y_2, \quad (7)$$

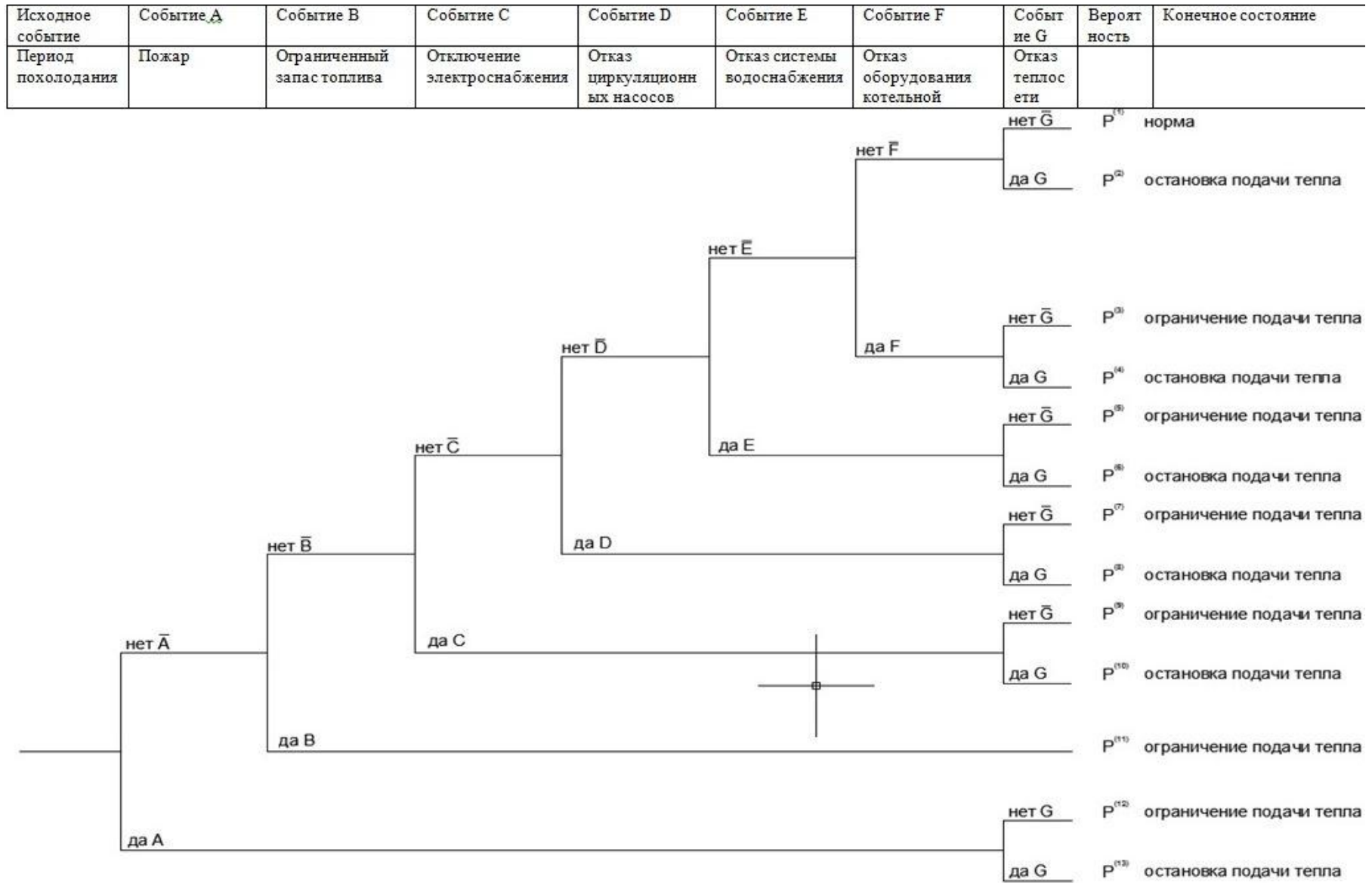


Рисунок 1 - Вероятностная схема дерева событий

12.4. Риск событий, приводящих к полной остановке подачи тепла при высоких потерях с эвакуацией равен:

$$R_3 = Q_{\text{ост}} \cdot Y_3. \quad (8)$$

12.5. Принимаются осредненные значения ущербов:

$$Y_1 = 5 \cdot 10^3 \cdot \text{МРОТ};$$

$$Y_2 = 5 \cdot 10^5 \cdot \text{МРОТ};$$

$$Y_3 = 5 \cdot 10^6 \cdot \text{МРОТ}.$$

13. РАЗРАБОТКА РЕКОМЕНДАЦИЙ ПО УМЕНЬШЕНИЮ РИСКА

13.1. Разработка рекомендаций по уменьшению риска является заключительным этапом анализа риска. В рекомендациях представляются обоснованные меры по уменьшению риска, основанные на результатах оценок риска.

13.2. Меры по уменьшению риска могут иметь технический и (или) организационный характер. В выборе типа меры решающее значение имеет общая оценка действенности и надежности мер, оказывающих влияние на риск, а так же размер затрат на их реализацию.

13.3. На стадии эксплуатации опасного производственного объекта организационные меры могут компенсировать ограниченные возможности для принятия крупных технических мер по уменьшению риска.

13.4. При разработке мер по уменьшению риска, необходимо учитывать, что вследствие возможной ограниченности ресурсов, в первую очередь должны разрабатываться простейшие и связанные с наименьшими затратами рекомендации, а также меры на ближайшую перспективу.

13.5. В большинстве случаев первоочередными мерами обеспечения безопасности, как правило, являются меры предупреждения аварии. Выбор планируемых для внедрения мер безопасности имеет следующие приоритеты:

1). меры уменьшения вероятности возникновения АС, включающие:

- меры уменьшения вероятности возникновения отказа;
- меры уменьшения вероятности перерастания отказа.

2). меры уменьшения тяжести последствий аварии, которые, в свою очередь, имеют следующие приоритеты:

- меры, предусматриваемые при проектировании опасного объекта;
- меры, относящиеся к системам противоаварийной защиты и контроля;
- меры, касающиеся готовности эксплуатирующей организации к локализации и ликвидации последствий аварий.

13.6. При необходимости обоснования и оценки эффективности предлагаемых мер уменьшения риска рекомендуется придерживаться двух альтернативных целей их оптимизации:

- при заданных средствах обеспечить максимальное снижение риска эксплуатации опасного производственного объекта;
- обеспечить снижение риска до приемлемого уровня при минимальных затратах.

13.7. Для определения приоритетности выполнения мер по уменьшению риска в условиях заданных средств или ограниченности ресурсов следует:

- определить совокупность мер, которые могут быть реализованы при заданных объемах финансирования;
- ранжировать эти меры по показателю «эффективность-затраты»;
- обосновать и оценить эффективность предлагаемых мер.